



## ISTOM

### Ecole supérieure d'Agro-Développement International

32, Boulevard du Port - 95094 - Cergy-Pontoise Cedex  
tél : 01.30.75.62.60 télécopie : 01.30.75.62.61 [istom@istom.net](mailto:istom@istom.net)

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

**Contribution à un travail de recherche sur l'intérêt d'une culture de canne à sucre à usage de combustible en Guadeloupe dans des sols contaminés à la chlordécone : devenir du contaminant dans la plante, de l'absorption à la combustion.**



Photo 1: Vue aérienne d'une partie du dispositif expérimental REBECCA à la ferme du Fromager, Capesterre-Belle-Eau, le 1 juin 2012. Chopart, 2012.

**Soutenu à l'ISTOM en octobre 2012**



**MARIE Pauline**

Promotion 98

Stage effectué à Capesterre Belle Eau,  
Guadeloupe

Du 06/02/12 au 06/08/12

Au sein du CIRAD

Maître de stage : Jean-Louis Chopart

Tuteur de mémoire : Adrián Costera Pastor





**ISTOM**  
**Ecole supérieure d'Agro-Développement International**

32, Boulevard du Port - 95094 - Cergy-Pontoise Cedex  
tél : 01.30.75.62.60 télécopie : 01.30.75.62.61 [istom@istom.net](mailto:istom@istom.net)

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**Contribution à un travail de recherche sur l'intérêt d'une culture de canne à sucre à usage de combustible en Guadeloupe dans des sols contaminés à la chlordécone : devenir du contaminant dans la plante, de l'absorption à la combustion.**

**Soutenu à l'ISTOM en octobre 2012**



**MARIE Pauline**

Promotion 98  
Stage effectué à Caïpesterre Belle Eau,  
Guadeloupe  
Du 06/02/12 au 06/08/12  
Au sein du CIRAD

Maître de stage : Jean-Louis Chopart  
Tuteur de mémoire : Adrián Costera Pastor



## Résumé

Le projet REBECCA (REcherche Biomasse Energie Canne à CApesterre) est un programme de recherche qui étudie les conditions de mise en place d'une filière canne-énergie dans le sud de la Basse Terre en Guadeloupe. Ce programme vise à produire de l'électricité à partir de biomasse de cannes à sucre cultivées spécifiquement à cet effet, en particulier sur des sols pollués à la chlordécone (CLD). Il s'agit donc de vérifier que cette future filière ne contribue pas à la diffusion de la molécule dans l'environnement. Des travaux ont alors été réalisés afin d'évaluer les teneurs en CLD dans les différentes composantes de la biomasse des cannes ainsi que dans les cendres issues de la combustion. Les résultats obtenus ont montré que les quantités de CLD contenues dans les parties de la plante qui seront brûlées sont relativement faibles et ont permis de conclure sur la faible diffusion de cette molécule dans l'environnement via cette filière.

**Mots clés:** chlordécone, combustion, Guadeloupe, filière canne-énergie, environnement, pollution

## Summary

The REBECCA project (REcherche Biomasse Energie Canne à CApesterre) is a research program studying the necessary conditions to develop the sugar cane energy sector in the south of Basse-Terre in Guadeloupe. This programme aims to produce electricity from biomass cane grown specifically for that purpose, especially on soils contaminated with chlordécone (CLD). It consists in control that this future sector does not contribute to the diffusion of the molecule in the environment. That's why work was then carried out in order to estimate the concentration of CLD in the biomass of sugar cane and in the ash from combustion. Results showed that quantities of CLD contained in the burned biomass were relatively low and permitted to conclude on the low diffusion of the molecule into the environment.

**Key words:** chlordecone, combustion, Guadeloupe, cane energy sector, environment, contamination

## Resumen

El proyecto REBECCA (*REcherche Biomasse Energie Canne à CApesterre*) es un programa de investigación que estudia las condiciones de implantación de una filial de caña en el Sud de la *Basse Terre* en la Isla de Guadalupe. Este programa pretende producir electricidad a partir de biomasa de cañas cultivadas específicamente a este propósito, en particular en los suelos contaminados por la *clordecona* (CLD). Se trata entonces de comprobar que esta futura filial no contribuya a la difusión de moléculas en el entorno. Investigaciones fueron realizadas para evaluar las proporciones de CLD en los diferentes componentes de la biomasa de las cañas, tal como en las cenizas resultantes de la combustión. Los resultados obtenidos mostraron que las cantidades de CLD contenidas en los elementos de la planta que están por quemar son bastante débiles, y permitieron demostrar, a partir de esta filial, la débil difusión de esta molécula en el entorno.

**Palabras claves:** *clordecona, combustión, Guadalupe, filial, caña-energía, entorno, contaminación.*

## Table des matières

<b>Résumé .....</b>	<b>3</b>
<b>Table des matières .....</b>	<b>4</b>
<b>Table des illustrations .....</b>	<b>6</b>
<b>Liste des abréviations et sigles.....</b>	<b>8</b>
<b>Remerciements .....</b>	<b>10</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>11</b>
 <b>Partie I. Le programme REBECCA : contexte et justification de sa mise en place. ....</b>	 <b>13</b>
I. Enjeu Energétique .....	13
I.1. Enjeu énergétique de la Guadeloupe .....	13
I.2. Potentiel énergétique de la Canne.....	15
II. Enjeu socio-économique et agricole .....	19
II.1. Un secteur agricole fragilisé.....	19
II.2 Diversification face aux difficultés rencontrées par la filière canne-sucre-rhum et bananes.....	20
III. Enjeu environnemental, pollution par la chlordécone et GES.....	22
III.1. Etat des lieux de la pollution par la chlordécone aux Antilles.....	22
III.2. Emissions des gaz à effet de serre en Guadeloupe (GES) .....	25
 <b>Partie II. Etude de la contamination de la canne à sucre par la chlordécone (CLD) .....</b>	 <b>28</b>
I. Le problème de la chlordécone en Guadeloupe .....	28
I.1. Présentation de la molécule de chlordécone .....	28
I.2. Rémanence de la pollution.....	28
I.3. Transfert de la chlordécone du sol vers la plante .....	30
II. Caractérisation et conséquences des mobilisations en chlordécone par quatre variétés de cannes fibres et une variété de canne à sucre .....	33
II.1. Objectif spécifique .....	33
II.2. Matériel et Méthode .....	33
II.3. Résultats .....	42
II.4 - Discussion : .....	55
III. Evaluation des teneurs en chlordécone dans les cendres issus de la combustion de bagasse.....	56
III.1. Objectif spécifique .....	56
III.2. Matériel et méthode .....	56

III.3. Résultats et discussion .....	57
<b>Partie III. Discussion générale sur la mise en place d'une filière canne combustible.....</b>	<b>59</b>
I. Impact de la mise en place de cette filière canne énergie sur l'environnement .....	59
I.1. Aspect environnemental lié à la présence de la chlordécone .....	59
I.2. Exportation de la biomasse et équilibre organique des sols .....	60
I.3. Analyse du cycle de vie (ACV) de la filière canne-électricité .....	61
II. Dépendance énergétique .....	63
III. Perception de la filière canne-fibre par les acteurs agricoles .....	64
IV. Durabilité des systèmes et développement de l'île .....	66
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>68</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>70</b>
<b>Tables des annexes .....</b>	<b>75</b>

# Table des illustrations

## **TABLEAUX :**

Tableau 1 : Potentialité de production de trois espèces de type C4 (Poacées) et de trois espèces de type C3 (Boardman, 1977). Les résultats sont exprimés en fonction des matières sèches. Source : D.Pouzet, 2011. ....	15
Tableau 2 : Rendement des cannes (biomasse résiduelle incluse) en tonnes de MS/ha des variétés PR980 et US67-22-2. Données initialement en t/acres. Données issus du projet Hatillo (ALEXANDER A.G., et al, 1984). ....	18
Tableau 3: Comparaison de quelques propriétés d'une canne cultivée pour le sucre et de plusieurs variétés de canne cultivée pour la fibre. Les données concernent uniquement les tiges usinables. ....	18
Tableau 4 : Photosynthèse maximale chez quelques espèces de type C4 et C3 (d'après Osmond et al., 1982). Source : D.Pouzet, 2011. ....	26
Tableau 5 : Informations sur les variétés prélevées pour l'analyse. (Chopart 2012). ....	35
Tableau 6 : Teneurs en Chlordécone, en µg/kg de matière sèche du sol, des racines, des tiges souterraines et aériennes sur l'essai V3 à 8 mois (a) et V4 8 mois (b). (Marie 2012). ....	42
Tableau 7: teneurs en Chlordécone, en µg/kg de matière sèche du sol, des racines, des tiges souterraines et aériennes sur l'essai V3 à 12 mois (a) et V4 à 12 mois (b). ....	43
Tableau 8 : teneurs en Chlordécone, en µg/kg de matière sèche du sol, des racines, des tiges souterraines et aériennes sur l'essai V4 à 10 mois.. ....	44
Tableau 9: Teneur totale en chlordécone en mg/m² dans l'ensemble des composantes des cannes à 8 et 12 mois sur les essais V3 et V4. ....	49
Tableau 10 : Quantité de chlordécone biodisponible sur les essais V3 et V4 en fonction des teneurs en carbone organique (3, 3.5, 4 et 5 %). ....	51
Tableau 11: Quelques propriétés de la bagasse obtenues sur 4 échantillons. Les teneurs en fibres, matière minérale et sucres sont exprimés en % de matière sèche.. ....	57
Tableau 12 : Teneur en chlordécone en µg/Kg de poids sec de bagasse et de cendre issu de la manipulation combustion à Bologne. ....	57
Tableau 13: Données concernant la population guadeloupéenne, la consommation électrique par foyer en KWh/an ainsi que le nombre de foyers pouvant être alimentés par 5 Mw. ....	63
Tableau 14 : surface nécessaire pour alimenter la centrale électrique .....	63

## **FIGURES**

Figure 1: Part des énergies renouvelables dans la production d'électricité en Guadeloupe en 2006. PRERURE, 2008. ....	19
Figure 2 : Quantités de cannes entrantes à l'usine entre 1960 et 2007. Source : Rapport de campagne 2007, CTICS Guadeloupe 2010. ....	24
Figure 3 : Cartographie des sols potentiellement contaminés par la chlordécone dans le sud de la Basse-Terre. Source : DAAF-SA Guadeloupe, INRA-ASTRO, 2006. ....	284
Figure 4 : Structure de la molécule de chlordécone. Source : Toxicological review of Chlordécone, 2009. ....	28

Figure 5 : Modalités de diffusion en fonction de la constante loi de Henry de la substance. Trapp et McFarlane (1995).	34
Figure 6 : contamination des tiges de canne à sucre. Données obtenues à la Martinique sur 6 parcelles de 3 types de sol très pollués et 20 répétitions par parcelle. Lesueur-Jannoyer.M, 2010.	34
Figure 7: Configuration de l'essai variétal V4	34
Figure 8 : Schéma d'une parcelle élémentaire et plan d'échantillonnage.	34
Figure 9 : Différentes étapes de préparation des échantillons, cas des tiges de canne.	45
Figure 10 : Position des monolithes de mesures de densité racinaires par rapport au centre du rang et espaces représentatifs de chaque monolithe.	39
Figure 11: Teneur en Chlordécone (log $\mu\text{g/kg}$ MS) dans les composantes anatomiques des différentes variétés de cannes étudiées sur V4 et V3 à 8 mois.	47
Figure 12 : Gradient de concentration de la molécule de Chlordécone dans les différentes composantes anatomiques des parties restant au sol.	45
Figure 13 : Relation entre contamination en CLD et teneurs en fibre des parties souterraines.	47
Figure 14 : Relation entre contamination en chlordécone des entrenoeuds et teneurs en fibres des entrenoeuds.	47
Figure 15: Evolution des concentrations en chlordécone (en $\mu\text{g/kg}$ de PS, échelle logarithmique) dans les différents compartiments des cannes étudiées entre 8 et 12 mois.	48
Figure 16 : Essais V3 et V4. Teneurs en chlordécone (en $\text{g/ha}$ , échelle logarithmique) dans différentes parties de la plante sur des cannes âgées de 8 mois et 12 mois.	49
Figure 17 : Moyenne des longueurs des racines fines et grosses en $\text{m/m}^2$ dans l'horizon 0-30 cm chez trois variétés de cannes. Essai V4, 10 mois.	53
Figure 18 : Moyenne des surfaces de contact racines/sol des racines fines et grosses en $\text{m/m}^2$ dans l'horizon 0-30 cm chez trois variétés de cannes. Essai V4, 10 mois.	53
Figure 19: Absorption de la molécule de CLD biodisponible dans la solution du sol par les racines.	54
Figure 20 : Comparaison des profils environnementaux des scénarios 5MW, 10MW et du mix électrique Guadeloupe. Chacun des indicateurs choisis présente un maximum établi à 1 et porté par l'une des 3 options évaluée	62

## ILLUSTRATIONS

Photo 1 : Vue aérienne du dispositif expérimental REBECCA, Capesterre-Belle-Eau.	1
Photo 2 : Différentes composantes de la canne à sucre à vocation de combustible: tiges usinables, amarres et feuilles adhérentes.	38
Photo 3 : Visualisation de la limite entre la tige usinable et la tige sommitale.	38
Photo 4 : Echantillon de racines après séparation entre racines fines et grosses diamètre.	38
Photo 5 : Appareil de mesure de la qualité de la biomasse dans le programme REBECCA par spectroscopie dans le proche infrarouge (SPIR).	39b
Photo 6 : Parcelle après mesure destructive TC8 12 mois. Essai V3.	40b

## Liste des abréviations et sigles

---

°C : degré celcius

% : pourcentage

µg : microgramme

ACV : Analyse Cycle de Vie

AFSSA : Agence française de sécurité sanitaire des aliments

ANOVA : Analyse de la variance

CAS : canne à sucre

CEC : capacité d'échange cationique

CIRAD : centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le développement

CLD : chlordécone

COFRAC : Comité Français d'Accréditation

CTCS : Centre Technique de la Canne et du Sucre

CUMA : Coopérative d'Utilisation de Matériel Agricole

DAAF : Direction de l'Alimentation de l'Agriculture et de la Forêt

DOM : Département d'Outre-mer

ENR : Energies renouvelables

Etc : et caetera

g : grammes

GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

GWh : GigaWatt heure

h : heure

ha : hectares

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

J : joules

kg : kilogrammes

Koc : Coefficient de partage carbone organique/eau

Kow : Coefficient de partage octanol/eau

LMR : Limite Maximale de Résidus

mg : milligrammes

MF : matière fraîche

MJ : méga joule

MS : matière sèche

N 1-5 : entrenœuds 1 à 5

N 6-10 : entrenœuds 6 à 10

N 11-20 : entrenœuds 11 à 20

NIRS : Near-infrared spectroscopy

PCI : pouvoir calorifique inférieur

PCS : pouvoir calorifique supérieur

PF : poids frais

PRAM : Pôle de Recherche Agro-environnementale de la Martinique

PRERURE : Plan énergétique régional pluriannuel de prospection et d'exploitation des énergies renouvelables et d'utilisation de l'énergie



PS : poids sec

SAU : Surface Agricole Utile

SOC : Soil Organic Carbon

SPIR : Spectroscopie Proche Infrarouge

SPV : Service de Protection des Végétaux

SS : sol sec

t : tonne

TS : tiges souterraines

UDCAG : Union Développement Cannier Agricole Guadeloupe

VTR : Valeur Toxicologique de Référence

## Remerciements

---

Je tiens à remercier toutes les personnes sans qui la réalisation de ce stage et de ce mémoire n'aurait pas été possible.

Je voudrais dans un premier temps remercier Jean-Louis Chopart, mon maître de stage, pour m'avoir permis de vivre cette expérience très enrichissante ainsi que pour sa disponibilité et ses conseils.

Je remercie également les techniciens et ingénieurs du projet : Patrick Jacquet, Bernard Marseille et Frantz Imanbakas pour leur aide sur le terrain et pour m'avoir formée sur certains aspects techniques du projet.

Je remercie aussi mon tuteur de l'ISTOM, Adrián Costera Pastor, qui m'a conseillé tout au long de la rédaction de ce mémoire.

Merci également à Emilie, Aurore, Lil, Louis-Marie et Xavier pour tous ces moments formidables qu'on a partagé durant ces six mois.

## Introduction

---

La culture de la canne à sucre constitue un des piliers de l'économie de la Guadeloupe. Aujourd'hui 64 % de la surface agricole utile (SAU) est destinée à sa production (Agreste, 2011). Actuellement, la transformation en sucre et en rhum est la principale utilisation de la canne à sucre sur l'île. Outre cette production alimentaire, la canne à sucre est déjà également une source d'énergie renouvelable grâce à la valorisation de la bagasse dans les usines sucrières ou les distilleries pour faire de la vapeur et de l'électricité. Dans un contexte de recherche de l'autonomie énergétique et d'un épuisement progressif des énergies fossiles, le développement et la valorisation de la biomasse comme source énergétique alternative semble être prometteuse. Il constitue, en outre, l'une des voies importantes choisies par l'Union Européenne et la France pour participer à la maîtrise des consommations de ressources non renouvelables et lutter contre le changement climatique. La biomasse désigne ici l'ensemble des matières organiques d'origine végétale (bois, plantes herbacées, résidus de l'agriculture et de l'agroalimentaire) pouvant devenir source d'énergie par combustion. Il s'agit d'une ressource dont le potentiel énergétique est resté jusqu'ici largement sous exploité avec près de 60 % de la production mondiale non valorisée (Demirbas 2001).

Ces dernières années, l'utilisation de la canne à sucre à des fins énergétiques se développe de façon spectaculaire sur la planète même si cela concerne surtout, pour le moment, la production de biocarburants à partir du jus de canne et d'électricité à partir de la bagasse. En effet, la canne à sucre est parmi les plantes qui ont le plus fort rendement photosynthétique et représente une source de biomasse supérieure aux autres cultures de part ces rendements en matière fraîche de tiges usinables particulièrement élevés qui peuvent être supérieurs à 100 t/ha/an. Elle présente donc les caractéristiques d'une culture à fort potentiel bioénergétique.

C'est dans ce contexte que le programme de recherche ReBECCA (REcherche Biomasse Energie Canne à CApesterre) a vu le jour. Il s'appuie sur un projet de recherche élaboré en 2009, labellisé par les pôles de compétitivité Synergîle (en Guadeloupe) et Capénergies (en métropole). En avril 2010, une convention a alors été signée entre le préfet de Guadeloupe et le directeur du Cirad. Celle-ci est mise en œuvre à travers un partenariat entre le centre de recherche du Cirad et un industriel (Cann'Elec développement). Ce projet vise à concevoir une filière de production d'électricité à partir de la biomasse cannière cultivée spécifiquement pour cet usage dans le but de réduire la dépendance énergétique de la Guadeloupe. Les Antilles étant aussi confrontées à un fort enjeu environnemental et sanitaire due à la pollution par la chlordécone, la mise en place de cette filière permettrait de reconverter à moindre frais les sols contaminés. L'objectif final est la construction d'une centrale électrique de puissance continue nette de 5 MW à l'horizon 2016-2017, dans le but de contribuer à la satisfaction des besoins identifiés à l'échéance 2020 (Pouzet.D et al, 2009).

Ce programme est prévu pour se dérouler sur une durée de deux fois deux ans afin de pouvoir répondre aux divers questionnements agronomiques (variétés, rendements), économiques (rémunération de la biomasse, rentabilité), environnementaux (devenir de la Chlordécone lors de la combustion) et technique (rendement de conversion, humidité biomasse) suscité par le développement d'une filière canne-énergie. Les différents objectifs sont scindés en deux

phases. La première phase (mi 2010 au 30 juin 2012) dans laquelle s'insère ce mémoire, a abordé en priorité les aspects agronomiques du projet. Dans le cadre de ce mémoire, seuls les aspects de la phase une du projet, et plus particulièrement l'aspect agro-environnemental, seront donc abordés.

Les recherches menées par le CIRAD au cours de la phase une ont visé à démontrer la faisabilité de la mise en place d'une filière canne-énergie dans la région de Capesterre-Belle-Eau, zone où les sols sont parmi les plus contaminés par la CLD. Il est nécessaire d'obtenir une production de biomasse continue et régulière tout au long de l'année afin d'alimenter la ou les futures centrales. D'autre part, cette production se doit d'être durable et rentable. Pour cela, les différentes études menées consistent à :

- Sélectionner les variétés les plus prometteuses parmi le matériel végétal déjà disponible,
- Optimiser les pratiques culturales afin de produire toute l'année une biomasse fournissant le maximum de calories par unité de surface et de temps,
- Suivre l'évolution de la chlordécone dans la plante et les produits de combustion
- Evaluer la rentabilité de la filière.

Dans un premier temps nous reviendrons sur les différents aspects énergétiques, économiques et environnementaux qui ont motivé la mise en place d'un tel projet. Nous aborderons ensuite la problématique de la chlordécone (qui a constitué le volet original de ce programme) en nous intéressant plus précisément à la mobilisation de cette molécule par différentes variétés de cannes et aux conséquences lors de la combustion. Pour finir, nous discuterons les différents résultats obtenus et certaines conditions relatives à la mise en place de cette filière canne-énergie, dont celle liées à la problématique de la chlordécone.

# Partie I. Le programme REBECCA : contexte et justification de sa mise en place.

---

Le programme de recherche REBECCA, vise à identifier les conditions de développement d'une filière biomasse-énergie à partir d'une culture de cannes riches en fibres dédiée à cet effet. Cette première partie aura pour objectif de détailler les aspects énergétiques, environnementaux et socio-économiques favorables à la mise en place de ce programme.

## I. Enjeu Energétique

### I.1. Enjeu énergétique de la Guadeloupe

La problématique énergétique de la Guadeloupe est triple. Tout d'abord, la Guadeloupe ne dispose d'aucune ressource énergétique fossile et importe la majeure partie de sa consommation énergétique. Ainsi, le taux de dépendance énergétique<sup>1</sup> de l'île est supérieur à 90% contre 54,5% pour la métropole (Insee, 2010). D'autre part son insularité ne permet aucune interconnexion avec les réseaux électriques continentaux et l'approvisionnement énergétique se fait donc par voie maritime. La troisième contrainte à laquelle est soumise la Guadeloupe est la faible taille de son réseau énergétique. Ces trois contraintes ont des répercussions importantes sur les prix de l'énergie finales, qui sont supérieurs aux prix métropolitains et beaucoup plus fluctuants. A cela s'ajoute une hausse récente des consommations énergétiques et notamment électriques en Guadeloupe.

En 2006, la consommation d'énergie finale s'élevait à 4 312 GWh (Plan énergétique régional pluriannuel de prospection et d'exploitation des énergies renouvelables et d'utilisation de l'énergie : PRERURE, 2008). 70% des consommations d'énergie finale sont absorbées par les transports et l'habitat. Les secteurs industriel et tertiaire absorbent près de 20 % des consommations d'énergie finale. 92 % des 7600 GWh d'énergie primaire consommés en Guadeloupe sont importés : le carburant pour les véhicules, les combustibles pour les centrales thermiques et enfin le charbon alimentant la Centrale Thermique du Moule proviennent exclusivement de l'extérieur. En effet la Guadeloupe ne dispose d'aucun gisement fossile. Entre 2000 et 2006 la consommation en énergie a augmenté de 2,1%, soit autant qu'entre 1996 et 2001 (PRERURE, 2008). Cette croissance est liée à la croissance économique et démographique.

Selon les scénarios du PRERURE, la dépendance énergétique risque d'être encore accentuée en raison d'une forte croissance des consommations d'énergie d'ici 2020, à la fois à cause du développement des usages de l'électricité (climatisation, eau chaude sanitaire, électroménager) et du développement des transports. Selon un scénario tendanciel, le rythme

---

<sup>1</sup> Rapport entre la production nationale d'énergies primaires (charbon, pétrole, gaz naturel, nucléaire, hydraulique, énergies renouvelables) et la consommation en énergie primaire, une année donnée. INSEE.

de croissance attendu s'élève à 3,9% par an. A l'horizon 2020, les consommations d'énergie finales atteindraient 7 290 GWh contre 4 312 GWh en 2006 (PRERURE 2008). Dans cette configuration et en l'absence de changement dans la politique énergétique, la dépendance énergétique de la Guadeloupe s'accroîtra encore.

L'électricité fait partie des énergies les plus demandées en Guadeloupe avec une augmentation des consommations de 27 % entre 2000 et 2006. En 2006 la production était proche de 1500 GWh. Les énergies fossiles y ont contribué fortement avec 1300 GWh. En 2006, la production électrique issue des énergies renouvelables (ENR) s'élevait à 208 GWh. Les ENR proviennent principalement de la géothermie et de la bagasse qui fournissent respectivement 78 et 74 GWh (PRERURE 2008). On retrouve ensuite l'éolien (35 GWh) puis l'hydroélectricité (19 GWh) et le photovoltaïque (3 GWh). La valorisation de la bagasse représente donc 4,8 % de la production d'énergie renouvelable (figure 1), mais sa disponibilité est faible puisque cette ressource n'est utilisable que pendant la campagne sucrière (de février à juin) contrairement aux énergies issues de la géothermie. La bagasse issue de l'usine sucrière de Gardel (environ 140 000 tonnes par campagne, PRERURE 2008) est valorisée par la Séchilienne SIDECE Compagnie Thermique du Moule (CTM) qui exploite une centrale thermique en activité depuis 1998. En dehors de la campagne sucrière, le charbon est utilisé seul.

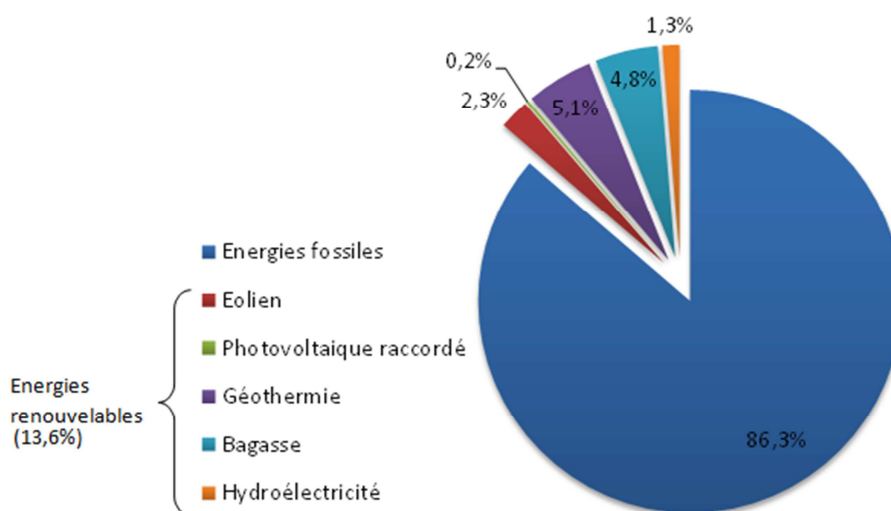


Figure 1 : Part des énergies renouvelables dans la production d'électricité en Guadeloupe en 2006. PRERURE, 2008.

Néanmoins, le potentiel de développement des énergies renouvelables est encore largement inexploité. Dans le secteur de l'électricité, les énergies renouvelables représentent seulement 13% de la consommation d'énergie primaires (figure 1).

La région Guadeloupe s'est donc engagée dans l'élaboration d'un plan énergétique régional pluriannuel de prospection et d'exploitation des énergies renouvelables et d'utilisation de l'énergie (PRERURE). Ce plan s'est fixé comme objectif de maîtriser la demande énergétique en soutenant le développement des énergies renouvelables afin de diminuer sa dépendance énergétique tout en réduisant l'impact environnemental. D'après un scénario volontariste, la

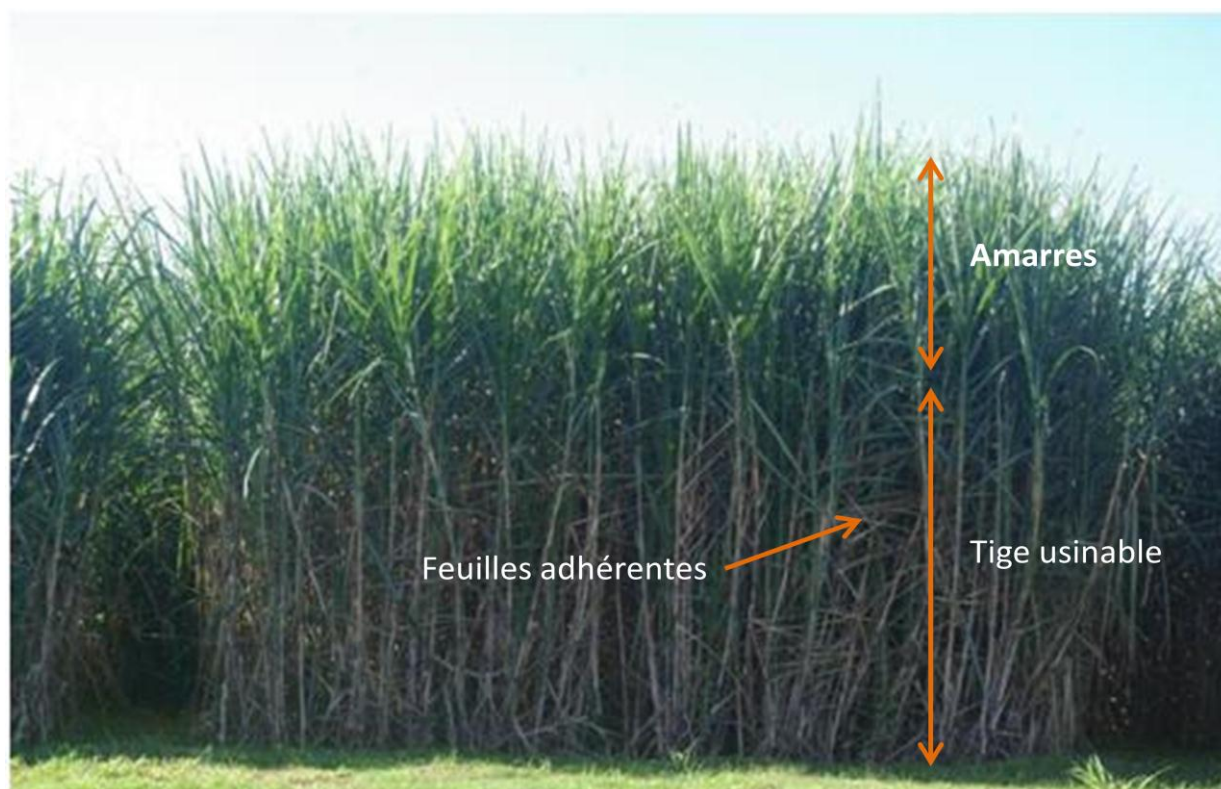


Photo 2 : Différentes composantes de la canne à sucre à vocation de combustible: tiges utilisables, amarres et feuilles adhérentes. Essai V 4 variété WI 81456 en novembre 2011 âgée de 8 mois. Marie 2012.

Guadeloupe s'est fixée pour objectif de développer la part des énergies renouvelables à hauteur de 24 % de la production d'électricité d'ici 2020, ce qui reste inférieur à la limite technique de 30 % définie par EDF (Prerure 2008).

Le programme REBECCA propose et étudie une voie pour pallier à ces contraintes en développant une filière canne-énergie qui vise à produire de l'électricité localement à partir de la combustion de la biomasse de canne dédiée à cet effet. La biomasse serait donc disponible la plus grande partie de l'année permettant ainsi une alimentation en continue d'une centrale électrique d'une puissance de 5 Mw, contrairement à la centrale électrique du Moule dont l'alimentation se fait à partir de charbon en dehors de la campagne sucrière soit sept mois sur douze. Cette filière aurait l'avantage de produire de l'énergie presque en continue à partir de la biomasse de canne, contrairement aux énergies éoliennes, solaires et photovoltaïques qui sont plus aléatoires.

## I.2. Potentiel énergétique de la Canne

### I.2.1. Des cannes à vocation énergétique

Dans le cadre du programme Rebecca, la matière première qui constitue le combustible est la canne entière, à savoir les tiges, les amarres (extrémités hautes des tiges) ainsi que les feuilles adhérentes (photo 2). Contrairement à d'autres programmes de recherche qui s'intéressent à une canne mixte (forte teneur en fibre et en sucre), le programme Rebecca vise à sélectionner une canne sur le critère du pouvoir énergétique via une teneur en biomasse fibreuse élevée (lignine, cellulose, hémicellulose). L'objectif principal est d'obtenir un fort pouvoir calorifique à l'hectare, en sélectionnant des variétés parmi celles déjà existantes, et de pouvoir récolter la canne tout au long de l'année afin d'approvisionner la centrale en continue.

Outre le contexte agricole de la Guadeloupe, le choix de la valorisation énergétique de la biomasse lignocellulosique s'est porté sur la canne à sucre car il s'agit d'une des cultures les plus performantes pour produire de la biomasse, grâce à une efficacité photosynthétique supérieure aux autres plantes (tableau 1).

Tableau 1: Potentialité de production de trois espèces de type C4 (Poacées) et de trois espèces de type C3 (Boardman, 1977). Les résultats sont exprimés en fonction des matières sèches. Source : D.Pouzet, 2011.

Types	Espèce	jour	t/ha	g/m <sup>2</sup> /j
C4	Pennisetum purpureum	365	83,3	23,3
	Saccharum officinarum	365	67,3	18,4
	Sorghum.sp	120	27,3	23
C3	Manihot esculenta	365	41	11,2
	Beta vulgaris	240	33,8	14
	Glycine max	130	8,9	6,8



Selon Klass (1998), les plantes du complexe *Saccharum*, ont, avec le *Pennisetum purpureum* (herbe à éléphants), le potentiel le plus élevé des plantes terrestres. D'après Alexander (1885) et Hunsigi (1995), les variétés fibreuses de *Saccharum* ont des potentiels de production de biomasse bien supérieurs à celui des arbres à croissance rapide avec des rendements annuels pouvant atteindre 35 tonnes/ha/an de matière sèche de tiges usinables (Pouzet, 2011) contre des rendements allant de 20 à 25 tonnes/ha/an de matière sèche de tronc pour les arbres à croissance très rapide tel que l'Eucalyptus (Lacrau et al., 2009).

La canne à sucre est donc une plante particulièrement intéressante car elle présente les caractéristiques nécessaires pour la production de bioénergie, à savoir :

- Une croissance rapide : le cycle de la canne dure 12 mois ce qui en fait une matière première facilement mobilisable tout au long de l'année.
- Un rendement moyen en biomasse élevé (de l'ordre actuellement de 100 t/ha/an en production paysanne de tiges usinables avec une humidité d'environ 70% et de 150 t/ha pour les meilleures variétés en condition de production)
- Une production en énergie totale en sortie du système supérieure à l'énergie fossile nécessaire en entrée (Waclawovsky et al., 2010).

Toutefois, la capacité de production énergétique totale de la canne à sucre est encore mal connue puisque jusqu'à aujourd'hui seuls les coproduits, notamment la bagasse, sont utilisés à des fins énergétiques. On peut cependant calculer le rendement énergétique de la production comme étant le produit du rendement de la biomasse collectée (t/ha) par le pouvoir calorifique (exprimé en kJ/g) de cette biomasse. Le pouvoir calorifique représente le contenu énergétique d'un combustible, il dépend de la teneur en composantes combustibles (carbohydrates) et non combustibles (eau et matières minérales) ainsi que des caractéristiques chimiques de ces composantes (C, H et O).

Deux valeurs composent le pouvoir calorifique : le pouvoir calorifique supérieur (PCS) et le pouvoir calorifique inférieur (PCI). La différence entre les deux correspond à l'énergie latente de vaporisation de l'eau qui est récupérée pour le PCS mais pas pour le PCI. La teneur en eau de la biomasse joue à deux niveaux dans le rendement énergétique : sa part pondérale diminue la capacité énergétique spécifique et sa volatilisation absorbe de l'énergie qui n'est pas entièrement récupérée par condensation de la vapeur.

Si les valeurs du pouvoir calorifique de la bagasse sèche sont bien connues (PCS = 19,6 kJ g<sup>-1</sup> et PCI = 18,1 kJ g<sup>-1</sup>, Don et al., 1977 ), il existe très peu de données sur les autres composantes de la plante puisque seule la bagasse est utilisée à des fins énergétiques à l'heure actuelle.

Pouzet (2011) estime que plus d'un tiers de la biomasse et de son contenu énergétique est inexploité par les filières sucrières actuelles. L'utilisation de la canne entière (excepté les feuilles sèches tombées au sol) constituerait donc une source beaucoup plus importante de biomasse. D'ailleurs selon Alexander (1985), l'utilisation de l'ensemble de la plante conduit à une augmentation des quantités de biomasse (t/ha/an) de 46% par rapport à l'utilisation des

tiges seules. Toutefois, il y a très peu de données sur la « canne énergie » dans la littérature. Le concept d'utilisation de la « biomasse totale » de canne à sucre n'a été introduit qu'en 1982 par Alexander et al.. D'après lui, trois conditions sont essentielles pour assurer la réorientation des systèmes de culture cannières vers la production de biomasse :

- L'utilisation de la plante entière incluant les tiges sommitales et les feuilles,
- Cibler la conduite de la culture sur la croissance et maximiser la production de l'ensemble des composantes de la biomasse,
- L'intégration dans les systèmes de culture cannières de cultures associées, telles que des herbacées tropicales, afin d'assurer un approvisionnement continu au cours de l'année des unités industrielles de valorisation de la biomasse ligno-cellulosique.

### I.2.2. Quelques données issues de recherches menées sur des cannes fibreuses

L'étude la plus récente dont fait état la littérature sur la canne énergie est le projet Hatillo mené à Porto Rico (Alexander A.G et al., 1984). A la fin des années 60, la production de sucre est de moins en moins rentable. C'est dans ce contexte qu'a émergé le concept de canne énergie. Cette nouvelle utilisation de la canne à sucre en tant que canne à énergie est perçue comme une alternative économique plus avantageuse pour l'ensemble des acteurs de la filière.

Une phase de recherche agronomique a ainsi vu le jour en 1981. Les tests ont été effectués sur deux variétés de cannes : la PR 980 et l'US 67-22-2 considérées respectivement comme étant des cannes énergie de première et deuxième génération. Les deux variétés de cannes ont été plantées dans les mêmes conditions. La variété PR 980 a aussi été plantée et cultivée dans des conditions classiques propres à la canne à sucre traditionnelle et a constitué la parcelle témoin. A partir du sixième mois de plantation, tous les trois mois le rendement et la qualité des cannes de chaque parcelle ont été contrôlés et ce, jusqu'au 18ème mois, avant la récolte. Les rendements obtenus sont relativement faibles mais sont présentés à titre d'illustration. En raison de l'amélioration des techniques culturales, les rendements obtenus actuellement sont bien plus élevés.

Les rendements en tiges usinables les plus élevés ont été obtenus pour la variété US 67-22-2 avec une moyenne de 51 tonnes de matière fraîche par hectare alors que les rendements obtenus pour la PR 980 sont de 42 t/ha en condition intensive et 34 t/ha en condition témoin (Alexander A.G et al., 1984). De plus, la variété US 67-22-2 produit des quantités moyennes de matières sèches (biomasse résiduelle incluse) de 20 t/ha entre 12 et 18 mois qui sont supérieures à celles produites par la PR 980 cultivée en tant que canne énergie (14 t/ha) et la PR 980 témoin (12 t/ha) (tableau 2).

Tableau 2 : Rendement des cannes (biomasse résiduelle incluse) en tonnes de MS/ha des variétés PR980 et US67-22-2. Données initialement en t/acres. Données issus du projet Hatillo (ALEXANDER A.G., et al, 1984).

Traitement	12 mois	18 mois	Moyenne
Témoin PR 980 <sup>2</sup>	11	12	11.5
PR 980 (canne énergie) <sup>3</sup>	13	15	14
US 67-22-2 (canne énergie) <sup>4</sup>	20	20	20

L'US 67-22-2 possède aussi une autre caractéristique importante pour une canne à vocation énergétique, à savoir, une production de biomasse résiduelle importante qui s'élève à 9 t/ha à 12 mois et à 12 t/ha à 18 mois (Alexander A.G et al 1984). Ces résultats montrent donc que la canne énergie se distingue de la canne à sucre de par ses rendements plus élevés mais aussi par une importance de la biomasse résiduelle. D'autre part, les conditions de productions jouent aussi sur le rendement comme nous le montre cet exemple avec la variété PR 980. En jouant sur l'itinéraire technique il est donc possible d'optimiser les rendements.

Néanmoins, aujourd'hui, l'amélioration des techniques agricoles a permis d'obtenir des rendements bien plus importants que ceux présentés dans le projet Hatillo. Des données plus récentes, issues de recherches effectuées en Louisiane et à la Barbade sur des cannes à sucre et des cannes fibres, faisant état de rendements plus importants sont présentées dans le tableau 3.

Tableau 3 : Comparaison de quelques propriétés d'une canne cultivée pour le sucre et de plusieurs variétés de canne cultivée pour la fibre. Les données concernent uniquement les tiges usinables.

(Source : Rao, 2007 ; Giamalva et al. 1984 ; Clarke et Giamalva, 1986 ; Clarke et Keenlside, 1986 ; tableau consulté dans l'« Etude de faisabilité d'une unité pilote de valorisation énergétique de la biomasse cannière en Guadeloupe, Partie I : Situation initiale », de C. Lejars et D. Pouzet (2008))

	Commerciale	Cannes Fibres				
Variétés	CP65-357	B77602	WI87718	WI79460	WI181456	SP79-1002
Rdt t/ha	50	77,6	59,7	112,2	125,4	169
fibres %	13,4	14,8	18	26,9	23,9	28
MS %	29,6	34,2	36,5	41,1	36,1	39,1

Ces données sont en accord avec celles du projet Hatillo. En effet les variétés fibreuses présentent des rendements, des teneurs en fibres et des teneurs en matière sèche systématiquement supérieures à ceux de la variété commerciale. Ces deux paramètres et surtout la plus faible teneur en eau en font des variétés plus adaptées pour la production d'énergie par combustion que les variétés cultivées pour le sucre (voir partie I : I.2.1).

<sup>2</sup> Condition de culture de canne à sucre, non irriguée

<sup>3</sup> Canne énergie, irriguée

<sup>4</sup> Canne énergie, irriguée

## II. Enjeu socio-économique et agricole

### II.1. Un secteur agricole fragilisé

La filière canne-sucre-rhum constitue un des piliers de l'économie Guadeloupéenne. En 2009, l'agriculture guadeloupéenne représentait 2,6 % du produit intérieur brut de la région, soit 268 millions d'euros de production agricole. D'après le dernier recensement agricole de 2010, la culture de la canne s'élevait à 49 millions d'euros de production. La sole cannière occupe 44 % de la surface agricole utile de l'île, soit 14 173 ha sur 31 768 ha (Agreste, recensement agricole 2010). Cependant le secteur cannier est dépendant des aléas climatiques et fragilisé par les restructurations et mouvements sociaux. On constate qu'entre 1981 et 2010, la surface cannière de la Guadeloupe a été réduite d'un tiers, passant de 20 992 ha à 14 173ha. Parallèlement la surface agricole utile a diminué d'un quart. On note alors une forte diminution de la production. Alors qu'entre 1960 et 1979 les usines broyaient plus d'un million de tonnes de cannes par an, la quantité de cannes entrante dans les usines entre 1990 et 1999 a chuté à 539 400 tonnes (figure 2).

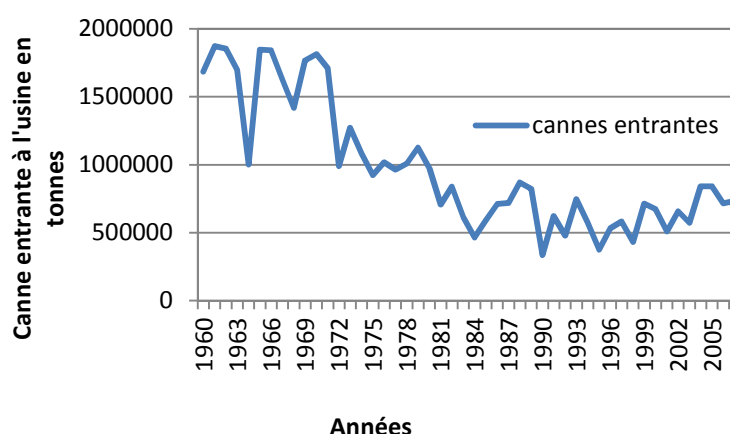


Figure 2: Quantités de cannes entrantes à l'usine entre 1960 et 2007. Source : Rapport de campagne 2007, CTICS Guadeloupe 2010.

Outre la diminution de la sole cannière, on note aussi une instabilité de la production due aux aléas climatiques. Une pluviométrie abondante entraîne une diminution de la richesse saccharine. Or, la rémunération des planteurs est indexée à cette richesse (seuil de rentabilité industriel pour la richesse établie à 6%).

Lorsque les planteurs sont impactés par une baisse de rendement, la filière entière est touchée. En effet, lors de la campagne de 1990, seulement 334 530 tonnes de cannes ont été récoltées sur la Guadeloupe (figure 2). Cette même année la production de sucre est la plus basse que la Guadeloupe n'est jamais connue avec 25 823 tonnes. A partir de cette année-là, la filière a été énormément subventionnée dans le but de relancer l'économie. Cependant, en raison de ces fluctuations toujours aussi présentes, la filière est de plus en plus subventionnée.

La filière banane connaît, elle aussi, des difficultés dans les Antilles françaises. En Guadeloupe, le nombre d'exploitations a chuté de 476 à 320 entre les années 2000 et 2004. La production de banane est confrontée à un certain nombre de difficultés liées en partie à

l'insularité et la situation ultrapériphérique de l'île. La majorité des exploitations a un « coût » de revient supérieur au revenu net moyen perçu. De ce fait, la production antillaise de banane ne peut être concurrentielle face à la production étrangère. Premièrement, l'étroitesse du marché agricole intérieur (intrant, machinisme agricole, etc.) entraîne des surcoûts au niveau de l'approvisionnement par rapport à d'autres zones où la taille du marché permet de réaliser des économies d'échelle. D'autre part, son statut de département français se traduit par un coût relativement élevé de la main d'œuvre. A tout cela s'ajoute l'importance des risques climatiques. La compétitivité de cette filière est donc étroitement tributaire du système d'aides mis en place par les pouvoirs publics et la communauté européenne pour soutenir le revenu des producteurs à un niveau suffisant et nécessaire au maintien de leur activité.

## II.2 Diversification face aux difficultés rencontrées par la filière canne-sucre-rhum et bananes

Bien que l'agriculture reste un secteur fondamental en Guadeloupe, son rôle dans l'économie tend visiblement à décliner ces dernières années. Ainsi, la mise en place d'une nouvelle filière canne énergie, participerait au développement de l'activité agricole en Guadeloupe. Cette nouvelle filière, tout en créant une certaine diversification agricole, devrait générer de nouvelles perspectives intéressantes pour l'emploi rural et l'activité économique, principalement dans la zone sud de Basse-Terre.

D'après le dernier Recensement Général Agricole (DAF, 2011), le territoire de Capesterre-Belle-Eau présente une SAU de 2 400 hectares qui est fortement en recul par rapport aux recensements précédents (4 500 ha en 1981). Les principaux usages du sol de la zone sont la culture de la banane avec près de 1235 ha soit 65 % de la bananeraie Guadeloupéenne, la culture de la canne à sucre avec 398 hectares et les jachères (336 ha) (DAF, 2011). Le reste concerne des prairies, des savanes pâturées, des cultures alimentaires à forte valeur ajoutée (ananas, banane créole, agrumes) destinées au marché local, des friches et des bois. Bien que l'industrie sucrière ait été très active par le passé, la surface consacrée à la culture de la canne actuellement est relativement faible et cela depuis la fermeture de la sucrerie Marquisat dans les années 60. Néanmoins, on note un retour de la production de canne à sucre principalement en rotation dans les systèmes bananiers.

La création d'une telle filière permettrait donc une diversification agricole intéressante notamment face aux difficultés rencontrées par les filières sucre et banane décrites précédemment. Elle constituerait une alternative non négligeable face aux aléas de marchés de ces filières et permettrait de maintenir une activité agricole dynamique dans la zone de Capesterre-Belle-Eau où l'implantation d'autres cultures peut constituer un risque compte tenu de la pollution à la chlordécone.

Cette nouvelle filière canne-fibres constituerait une opportunité face aux faibles rendements en sucre obtenus du fait d'une richesse saccharine atteignant seulement 6-7% en moyenne (CTICS 2005) en raison d'une pluviométrie élevée dans la région. D'autre part, les cannes

cultivées dans cette région sont relativement éloignées de la zone de traitement de la sucrerie Gardel (80 km). Les coûts de revient de la canne sont donc plus élevés pour les planteurs situés en Basse Terre. Ainsi, la mise en place de cette filière avec l'implantation d'une centrale électrique au sud de la Basse Terre permettrait de limiter les coûts et les temps de transports de matières premières. En effet, même si les planteurs reçoivent des aides au transport en fonction de la distance à parcourir, le coût du transport pour une exploitation située dans la zone de Capesterre B-E revient à 7 euros en moyenne par tonne de canne transportée (Bilionière, 2011). Ce coût serait à priori considérablement réduit avec l'implantation d'une nouvelle centrale dans la zone considérée. D'autre part, les itinéraires techniques nécessaires à la culture de la canne fibre ne diffèrent, à priori, que très peu des itinéraires techniques pratiqués localement pour la culture de la canne à sucre et le système d'organisation pour la récolte est déjà mis en place.

La mise en place de cette nouvelle filière devrait aussi avoir des effets bénéfiques sur l'emploi. La création d'emplois concernerait la production et la récolte de la biomasse ainsi que la sous traitance ou l'entretien de la centrale électrique (estimation de 38 emplois générés par la centrale, Lejars.C et Fusillier JL, 2012). D'autre part, d'après le partenaire industriel (Cann'élec développement), le revenu agricole devrait être garanti par contrats de longue durée (25 à 30 ans) avec des rémunérations basées sur le prix de l'électricité vendue dans le but de pérenniser la filière suivant la réglementation actuelle (EDF). Afin de rendre cette filière attractive pour les agriculteurs, le prix de revient de la canne fibre devrait être à priori équivalent à celui de la canne à sucre.

Le développement de cette filière permettrait aussi de garantir la relance d'exploitations en difficultés ou limitées financièrement. Cela, en assurant aux exploitants de nouveaux revenus leur permettant de limiter leur dépendance aux aléas de la production agricole et de ses marchés (ici banane et CAS) ainsi qu'en diversifiant leurs acheteurs.

La création d'une filière canne énergie constituerait donc une opportunité pour les planteurs de canne à sucre de la zone Basse-Terre en leur permettant de poursuivre cette culture à moindre coût de transport et sans être contraint par les faibles taux de richesses en sucres. Cette filière permettrait de redynamiser et valoriser le secteur agricole en offrant de nouveaux débouchés et semble ainsi être une opportunité économique intéressante à la fois pour les producteurs mais aussi pour la région de la Guadeloupe. D'autre part, son implantation au sud de la Basse-Terre constitue une solution alternative pour la reconversion des terres polluées par la Chlordécone.

### III. Enjeu environnemental, pollution par la chlordécone et GES

#### III.1. Etat des lieux de la pollution par la chlordécone aux Antilles

##### III.1.2. Généralité sur la chlordécone et son utilisation

La mise en place du programme Rebecca dans le sud de la Basse-Terre se justifie aussi par la présence de sols contaminés par la chlordécone. Etant donné les impacts négatifs de la chlordécone sur la santé humaine et animale, la pollution des sols au chlordécone limite les possibilités de production car la molécule contamine la plupart des cultures. La mise en place d'une culture canne-énergie est une bonne alternative puisqu'il ne s'agit pas d'une culture alimentaire.

La chlordécone a été synthétisée pour la première fois en 1952 et commercialisée en 1966 aux Etats-Unis sous le nom de Kepone®. Dès 1976 son utilisation est interdite aux Etats-Unis car la molécule est jugée dangereuse pour l'homme et l'environnement. En effet, les organochlorés sont considérés comme étant la famille de pesticides la plus dangereuse car ils se concentrent par bioaccumulation tout au long de la chaîne alimentaire.

Aux Antilles, la chlordécone a été utilisée pour lutter, entre autre, contre le charançon du bananier (*Cosmopolites sordidus*). De 1972 à 1977, la molécule était vendue sous le nom commercial de Kepone®, puis de 1981 à 1993 sous le nom de Curlone®. L'autorisation de mise sur le marché du Curlone est délivrée en décembre 1981, après réinstruction du dossier suite aux cyclones de 1979 et 1980 ayant causé des dégâts importants dans les bananeraies et les rendant plus vulnérables aux charançons. Son utilisation a entraîné une contamination hétérogène et diffuse des sols cultivées en raison de son application sous forme de poudre en cercle autour des troncs de Bananiers. La dose d'application recommandée était de 30 g de produit par pied par an soit 60 kg/ha par an en fonction du niveau d'infestation de la parcelle. Outre son utilisation dans les bananeraies, la chlordécone est aussi un produit de d'évolution du mirex® (Perchlordécone). Ce pesticide a été utilisé au cours des années 90 pour lutter contre la fourmi-manioc (*Acromyrmex octospinosus*) présentent sur la Grande-Terre et dans le nord-est de la Basse-Terre. D'après le service de protection des végétaux (SPV), les quantités de chlordécone pouvant dériver du Mirex® sont relativement marginales et ne représentent qu'un peu plus de 70 kg de chlordécone répartis sur les 100 ha de cultures concernés. Dans la zone concernée par notre étude on peut donc faire l'hypothèse que la chlordécone provient uniquement des traitements sur bananeraies.

Malgré sa séquestration à long terme dans les sols, la chlordécone peut contaminer les eaux (y compris l'eau distribuée par les réseaux d'eau potable), les sédiments, les cultures et les animaux. La population Antillaise subit donc une exposition à la pollution via l'alimentation (Dubuisson et al 2007). Même si l'effet exact du pesticide sur la santé humaine est encore mal connu, plusieurs études réalisées aux Etats-Unis lui attribuent un impact certain sur la santé (troubles neurologiques, cancers). Certains spécialistes ont mis en évidence l'absorption de la chlordécone (probablement par ingestion, inhalation et contact dermal) chez des ouvriers

américains, en mesurant sa concentration dans le sang suite à des expositions répétées au pesticide (Taylor, 1982). Les concentrations en chlordécone mesurées chez les patients atteints de symptômes neurologiques variaient entre 0.009 et 11.8 ppm (Cannon et al., 1978). D'autres spécialistes trouvent un lien significatif entre l'augmentation des cancers de la prostate et la pollution à la chlordécone (Multigner L et al, 2010). Selon lui, le risque de cancer est augmenté chez les patients ayant des concentrations sanguines supérieures à 1µg/L.

Des études toxicologiques sont actuellement menées par l'INSERM afin de mieux cerner les effets de la chlordécone sur la santé humaine. En l'absence de résultats définitifs et compte-tenu du peu de connaissances dont on dispose à propos des effets à long terme de l'exposition de l'Homme à cette pollution, des réglementations imposant des teneurs maximales ont été mises en place en Guadeloupe et en Martinique afin de diminuer le niveau d'exposition des populations et de gérer les éventuels aspects sanitaires de cette crise. Ces limites maximales de résidus (LMR) de chlordécone dans les denrées alimentaires ont été définies en 2005 par l'Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments (AFSSA/ Anses depuis 2010) en collaboration avec l'Institut de Veille Sanitaire (INVS) après une première évaluation de l'exposition des populations antillaises au chlordécone. Ces LMR ont été définies à partir d'une démarche agréée par l'OMS, qui croise des valeurs toxicologiques de référence (VTR) et les régimes alimentaires décrits dans une enquête de la Cellule interrégionale d'épidémiologie Antilles Guyane (CIREF) réalisée en Martinique. Deux limites d'exposition maximale provisoire ont été proposées dans le rapport de l'AFSSA en 2007:

- 50 µg/ kg de poids frais pour les aliments contribuant majoritairement à une exposition chronique : légumes racines, poulet, concombre, melon et tomate.
- 200 µg/ kg de poids frais pour tous les autres aliments afin de limiter les risques dus à une exposition accidentelle.

Des travaux de recherches ont aussi permis d'élaborer des outils à destination des professionnels et des particuliers dans le but d'aider les populations à mieux appréhender et gérer les risques liés à cette pollution. Par ailleurs, selon une étude menée par l'AFSSA, les populations les plus touchées sont celles vivant en zone contaminée et pratiquant l'autoconsommation.



### III.1.2. Localisation des surfaces contaminées en Guadeloupe

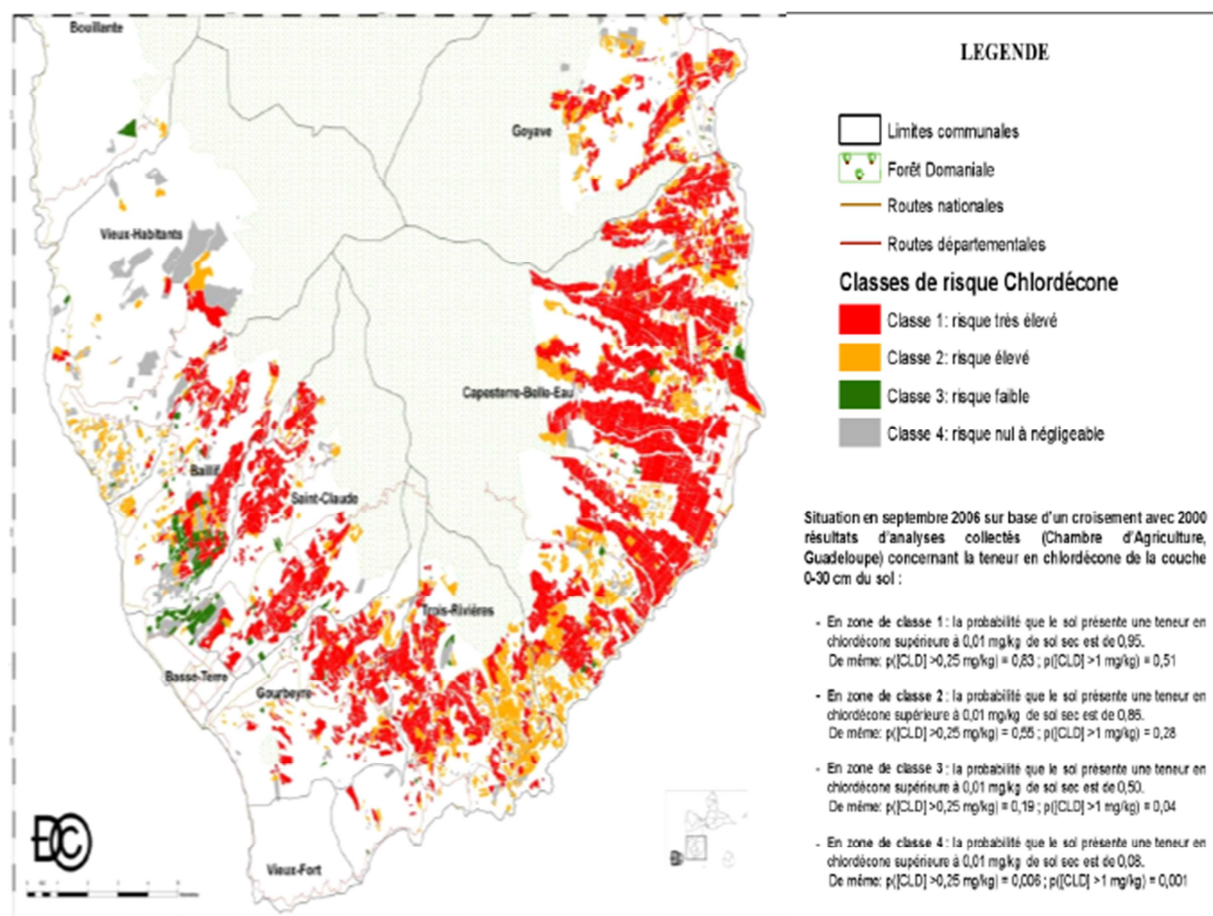


Figure 3 : Cartographie des sols potentiellement contaminés par la chlordécone dans le sud de la Basse-Terre. Source : DAAF-SA Guadeloupe, INRA-ASTRO, 2006.

La pollution par la chlordécone est localisée sur les sols de la Basse-Terre principalement dans les zones d'exploitation bananière (figure 3). Les cartes de risques de pollution ont été fondées sur l'occupation rétrospective en bananeraies pendant la période d'application de la chlordécone (à partir de photos et de cartes d'occupation du sol). La figure 3 ne représente donc pas la pollution réelle en chlordécone mais la contamination potentielle des sols à des niveaux plus ou moins élevés.

Quatre zones à risque de pollution ont alors été définies :

- Risque très fort : risque de teneur très élevée en raison de la présence de bananeraies pendant plus de dix ans.
- Risque fort : risque de teneur élevée en raison de la présence de bananeraies avant 1980 ou sur des ilots défrichés entre 1984 et 1987.
- Risque moyen : risque de teneur faible du fait de l'absence de bananeraies avant 1970 et après 1995. Présence de bananeraies entre 1977 et 1982.
- Risque faible à nul : absence de bananeraies sur les périodes considérées.

Cette carte a été validée par des analyses menées par la DAAF. On considère aujourd'hui que la part des terres polluées en Guadeloupe représente 1/5 de la surface agricole utile (SAU) de l'île (6 200 ha sur 34 800 ha, Marie-Galante incluse). Les concentrations en CLD sont variables dans les différents horizons du sol. En absence de travail du sol, la chlordécone est restée dans la couche superficielle du sol, 90 % du stock de chlordécone est restée localisée dans les 30 premiers centimètres. Néanmoins, dans la plupart des parcelles mécanisables, les stocks de CLD dans l'horizon 0-30 cm et 30-50 cm sont approximativement équivalents (Cabidoche et al., 2009). La propagation verticale de la molécule est donc liée uniquement aux travaux du sol (labour).

Du fait de ces pratiques de travail du sol, le diagnostic du niveau de pollution des sols est plus délicat. Ces cartographies de risques de pollution sont donc satisfaisantes à l'échelle du territoire mais à l'échelle de la parcelle il est indispensable de procéder à des analyses afin de connaître le niveau de pollution du sol.

### III.2. Emissions des gaz à effet de serre en Guadeloupe (GES)

#### III.2.1. Etat des lieux de la situation actuelle

Outre le problème environnemental lié à la pollution par la chlordécone, la Guadeloupe est aussi confrontée au problème des émissions de gaz à effet de serre (GES). Cette problématique a été traitée par le PRERURE qui a défini pour les 25 prochaines années la politique énergétique régionale dans un souci de réduction des gaz à effet de serre en soutenant les initiatives de recherche et de développement des énergies renouvelables. Un rapport final a été publié en mai 2008. Les résultats concernant les GES de la Guadeloupe ont été obtenus à partir de la méthodologie du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC). Ces résultats sont exprimés en équivalent CO<sub>2</sub><sup>5</sup>.

De manière générale, les émissions de GES par habitants des îles outre-mer sont inférieures à celle de la métropole. C'est le cas pour l'île de la Guadeloupe dont les émissions de GES s'élève à 4,1 tonnes/hab/an contre 9,5 tonnes/hab/an en France métropolitaine. Toutefois, les émissions liées au secteur énergétiques sont plus élevées en Guadeloupe qu'en métropole, il est donc intéressant d'analyser les différents postes d'émissions de la Guadeloupe afin d'identifier les leviers d'action permettant de réduire l'impact local sur l'environnement.

En 2006, les émissions de CO<sub>2</sub> liées à la production à des fins énergétiques se sont élevées à 1764 milliers de tonnes de CO<sub>2</sub>, soit 67 % des émissions de GES totales (2700 milliers de tonnes équivalent CO<sub>2</sub>). La production d'électricité émet à elle seule 1360 milliers de tonnes de CO<sub>2</sub> pour une production électrique de 1,8 TWh. La centrale à fioul lourd de Jarry Nord est celle qui produit le plus de CO<sub>2</sub> avec 43 % des émissions de GES et 45 % de la production électrique de l'île. Elle est suivie par la centrale bagasse charbon du Moule qui participe à 32% des émissions de CO<sub>2</sub> et à 23% de la production électrique. On considère que le contenu CO<sub>2</sub> de l'électricité en Guadeloupe s'élève à 759 g de CO<sub>2</sub>/kWh, ce qui est bien supérieur à

---

<sup>5</sup> Unité commune définie en fonction du CO<sub>2</sub> choisi comme gaz de référence. Son calcul fait intervenir deux éléments caractéristiques des GES : leur durée de vie dans l'atmosphère et leur capacité à absorber les infrarouges.

celui de l'échelle nationale (60-80g de CO<sub>2</sub>/kWh). L'importance du CO<sub>2</sub> émis par la production d'électricité en Guadeloupe s'explique par l'utilisation de combustibles fossiles (fuel, charbon) tandis que l'électricité métropolitaine est issue des centrales nucléaires, peu émettrice de CO<sub>2</sub>. Afin de limiter les émissions de CO<sub>2</sub> de la Guadeloupe, il apparaît clairement que les actions doivent être menées au niveau de la production d'énergie électrique. La mise en place d'une filière canne-énergie pourrait contribuer, à petite échelle, à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>.

### III.2.2. La canne à sucre comme source d'énergie renouvelable

La canne à sucre présente deux caractéristiques intéressantes d'un point de vue environnemental : elle est dépourvue de dioxyde de soufre et ne dégage que le dioxyde de carbone fixé lors de sa croissance.

La canne à sucre étant une plante de type « C4 » (sous type NADP-me), elle montre une bonne capacité à absorber le dioxyde de carbone (tableau 4) . En effet, la particularité des plantes en C4 réside dans la présence d'une enzyme supplémentaire, la PEP-Carboxylase, qui capte le CO<sub>2</sub> atmosphérique dans le mésophylle avant de le transférer à la Rubisco, qui est l'enzyme permettant de fixer le dioxyde de carbone. Il y a donc une concentration préalable du CO<sub>2</sub> qui entraîne ainsi une diminution de l'activité oxygénase de la rubisco et un meilleur rendement photosynthétique (tableau 4) .

Tableau 4 : Photosynthèse maximale chez quelques espèces de type C4 et C3 (d'après Osmond et al., 1982). Source : D.Pouzet, 2011.

Type	Espèce	Cotylédone	μmol CO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
C4	Saccharum (hybride)	mono	64
	Pennisetum typhoides (mil)		64
	Sorghum sudanense	di	57
	Atriplex sabulosa		28
C3	Triticum sp	mono	45
	Glycine max	di	27
	Helianthus annuus		28

En brûlant, la biomasse de canne à sucre libère certes du CO<sub>2</sub>, mais il ne s'ajoute pas à celui déjà contenu dans la biosphère. La photosynthèse de la canne à sucre en croissance compense cette émission. L'exploitation de la canne conduit donc à une quantité de CO<sub>2</sub> créée au proche de celle consommée. On considère donc que la combustion de la bagasse est neutre en termes d'émission de gaz à effet de serre. Seules les énergies grises, qui représentent la quantité d'énergie nécessaire au cycle de vie du produit, impactent le bilan carbone du produit. Elles concernent ici la production (culture et récolte) et le transport.

Le programme REBECCA s'insère donc dans les grandes orientations nationales du Grenelle de l'environnement et permet de répondre aux objectifs européens du « paquet énergie-climat<sup>6</sup> », en prenant en compte les spécificités et les atouts de la région Guadeloupe.

En effet, le programme Rebecca, tout en permettant de limiter les émissions de gaz à effet de serre, permettrait donc d'agir à la fois au profit de la maîtrise de l'énergie, de l'emploi, de l'innovation et du développement agricole et rural.

Toutefois, une phase de recherche est indispensable afin d'évaluer la faisabilité économique et technique du projet. Les travaux mis en place visent à réunir les conditions nécessaires à l'optimisation des rendements par la mise au point d'itinéraires techniques adaptés mais aussi, dans ce cas précis, à évaluer l'innocuité de cette nouvelle filière sur l'environnement, notamment lors de la combustion des cannes ayant été cultivées sur des sols contaminés. La deuxième partie de ce mémoire sera donc consacrée à l'étude de la teneur en chlordécone de plusieurs variétés de cannes fibre et d'une canne à sucre locale et des conséquences lors de la combustion, ce qui constitue un volet du programme Rebecca.

---

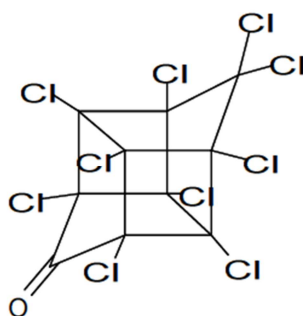
<sup>6</sup> Objectifs du « paquet énergie-climat » : augmenter de 20% l'efficacité énergétique; réduire de 20% les émissions de GES, atteindre une proportion de 20% d'énergies renouvelables dans la consommation énergétique totale (actuellement à 8,5%) de l'UE d'ici 2020. Plan adopté le 23 janvier 2008.

## Partie II. Etude de la contamination de la canne à sucre par la chlordécone (CLD)

### I. Le problème de la chlordécone en Guadeloupe

#### I.1. Présentation de la molécule de chlordécone

La chlordécone est un pesticide organochloré de formule chimique : 1,1a,3,5a,4,5,5a,6 decachlorooctahydro-1,3,4-metheno-2H-cyclobutane[c,d] pentalen-2-one (figure 4). Les organochlorés sont des composés organiques obtenus par chloration des différents hydrocarbures insaturés. La chlordécone est le résultat de la réaction entre l'hexachlorocyclopentadiène et l'anhydride sulfurique chauffés sous pression en présence d'un catalyseur (le pentachlorure d'antimoine). Elle est également obtenue naturellement dans le sol par photo-dégradation du Mirex. Les organochlorés sont caractérisés par une faible solubilité dans l'eau, une forte résistance à la dégradation biologique, chimique et photolytique (Simonich et Hites, 1995).



Formule brute	C <sub>10</sub> Cl <sub>10</sub> O
Masse molaire (g/mol)	490,636
Température de décomposition (°C)	350
Constante de Henry (atm.m <sup>3</sup> /mole)	2.5.10 <sup>-8</sup>
Surface moléculaire (Å <sup>2</sup> )	326,311
Volume moléculaire (Å <sup>3</sup> )	264,265
Log Kow	5,41

Figure 4 : Structure de la molécule de chlordécone. Source : Toxicological review of Chlordécone, 2009.

#### I.2. Rémanence de la pollution

A l'heure actuelle, peu de données sont disponibles sur cette molécule et son comportement en milieu tropical. En effet, l'essentiel des travaux menés sur la molécule de Chlordécone ont été réalisés aux Etats Unis (détenteurs du brevet).

Ces études ont montrées que la Chlordécone est une molécule particulièrement lipophile. La lipophilie d'une molécule est généralement évaluée en utilisant le coefficient de partage octanol/eau : log Kow<sup>7</sup>. Dans le cas de la CLD celui-ci est particulièrement élevé : log Kow = 5,4. Par conséquent, elle est peu soluble dans l'eau à faible pH (1-2mg/l à 20°C), sa solubilité augmente seulement dans des gammes de pH supérieures à 9 (Dawson et al, 1979). Comme les autres organochlorés, il s'agit d'un pesticide non ionisable.

<sup>7</sup> Rapport entre la concentration à l'équilibre d'une substance chimique dans l'octanol et la concentration en cette même substance dans l'eau. Ce coefficient est utilisé pour estimer, de façon indirecte, la sorption d'une substance organique dans un sol ou le facteur de bioconcentration.

Etant donné l'acidité des sols aux Antilles (pH eau 4 à 6) et la forte affinité de la molécule pour la matière organique (MO) des sols et des sédiments, la Chlordécone s'associe préférentiellement avec la matière solide. La littérature relate des valeurs de  $K_{oc}$ <sup>8</sup> de 2000 L/Kg Bonvallo et Dor, (2004) et 2500 L/Kg par Howard et al, (1981). Ainsi, dans des systèmes sol/eau à l'équilibre, les teneurs en chlordécone sont  $10^4$  à  $10^5$  fois supérieures dans les résidus que dans l'eau environnante (Dawson et al, 1979). Il s'agit de plus d'une molécule thermiquement stable, son point de sublimation est 350°C. Elle ne subit pas d'oxydation avant des températures de 450-500°C. A ces températures de grandes quantités de dérivé d'hexachlorobenzène sont produites (Dawson et al., 1979), l'incinération de la chlordécone nécessite donc des températures de l'ordre de 1000°C.

Les sols antillais sont en majorité caractérisés par une forte teneur en argile et en matière organique (MO) (Teneur en MO de 7% dans les andosols, Carib agro 2010). Cette composition explique donc la persistance particulièrement élevée de la molécule dans les sols. Ce type de sol a une forte tendance à adsorber de manière stable les polluants hydrophobes sur la matrice solide. De ce fait, le contaminant devient pratiquement inaccessible à toute attaque microbienne (Poggi-Varaldo et al, 2002) connue pour jouer un rôle important dans le métabolisme des insecticides organochlorés. La structure chimique particulière de la molécule semble aussi jouer sur l'absence de sa biodégradation. D'après une étude menée par Georges et Claxton en 1988, en milieu de culture liquide la chlordécone subit une biodégradation minime par des *Pseudomonas* (di-hydrogénation de 2 des 10 atomes de chlore). Cependant, les publications actuelles ne démontrent aucune transformation biologique de la chlordécone dans les sols, quel que soit le type de métabolisme. La persistance de la molécule peut alors s'expliquer soit par la non disponibilité des enzymes nécessaire à la dégradation de la CLD soit par l'inaccessibilité de la molécule par les bactéries (formation de complexe CLD-particules de l'environnement) (Macarie H. et Dolfing J., 2011).

La principale dynamique de désorption de la molécule semble être due à l'érosion des sols. Il s'agit du principal vecteur de transfert de la chlordécone vers les ressources en eaux adjacentes. Le taux de la contamination n'est pas égal dans tous les types de sols. Les quantités maximales ont été retrouvées dans les andosols qui présentent les stocks organiques les plus élevés, un  $K_{oc}$  élevé de 17 500 L/kg ainsi qu'un apport régulier de chlordécone entre 1972 et 1993 en raison de leur passé bananier. Les teneurs plus faibles enregistrées dans les autres types de sols (Ferrallitiques, bruns rouille à halloysite) sont liées à leur moindre capacité à sorber la chlordécone (Cabidoche et al., 2009). Ainsi, la durée de la contamination est variable selon les types de sols. Les travaux de Cabidoche et al. (2009) ont permis de développer un modèle de lessivage des sols basé sur des cinétiques de désorption de premier ordre (WISORCH : West-Indies Soils & ORgano-Chlorids). Les paramètres d'entrée du modèle sont le stock en carbone organique du sol (SOC) et le coefficient de partage  $K_{oc}$ . Il apparaît alors que la durée de la présence de la pollution par la CLD est variables selon le

---

<sup>8</sup> Coefficient de partage carbone organique - eau ( $K_{oc}$ ): reflète l'affinité de la molécule pour le sol et l'eau. Plus il est faible et plus l'affinité pour l'eau est élevée.



### I.3. Transfert de la chlordécone du sol vers la plante

**Henry's Law Constant (dimensionless)**

**movement by diffusion in air**

**diffusion both in air and water**

**movement by diffusion only in water phase**

**pesticides**

Pesticide	Henry's Law Constant (approx.)	Movement Category
F12 (CCl <sub>4</sub> )	100	movement by diffusion in air
ethyl bromide	1.0	movement by diffusion in air
carbon tetrachloride	1.0	movement by diffusion in air
bromonitroethylene	10 <sup>-1</sup>	movement by diffusion in air
dichloromethane	10 <sup>-1</sup>	movement by diffusion in air
naphthalene	10 <sup>-1</sup>	movement by diffusion in air
tetrachlorobiphenyl	10 <sup>-2</sup>	movement by diffusion in air
TCDD	10 <sup>-3</sup>	diffusion both in air and water
trifluralin	10 <sup>-3</sup>	diffusion both in air and water
nitrobenzene	10 <sup>-3</sup>	diffusion both in air and water
pentachlorophenol	10 <sup>-4</sup>	diffusion both in air and water
diethyl phthalate	10 <sup>-4</sup>	diffusion both in air and water
diethyl phthalate	10 <sup>-5</sup>	diffusion both in air and water
parathion	10 <sup>-5</sup>	diffusion both in air and water
dieldrin	10 <sup>-5</sup>	diffusion both in air and water
deltamethrin	10 <sup>-5</sup>	diffusion both in air and water
diuron	10 <sup>-6</sup>	diffusion both in air and water
carbofuran	10 <sup>-7</sup>	movement by diffusion only in water phase
aldicarb	10 <sup>-7</sup>	movement by diffusion only in water phase
chlordécone	10 <sup>-8</sup>	movement by diffusion only in water phase
metaxyl	10 <sup>-9</sup>	movement by diffusion only in water phase
prochloraz	10 <sup>-10</sup>	movement by diffusion only in water phase
hexazinone	10 <sup>-10</sup>	movement by diffusion only in water phase

La chlordécone est présente dans le sol sous différentes formes : dissoute dans la solution du sol, liée à la matrice organique ou minérale du sol. Seule la fraction biodisponible (chlordécone en solution) est susceptible d'être prélevée par la plante au cours de sa croissance. Cette fraction est fonction des propriétés physico-chimique de la chlordécone mais aussi des conditions du milieu, d'après Cabidoche et Lesueur-Jannoyer (2011), elle peut être exprimée comme suit :

$$[\text{CLD}]_{\text{bw}} = [\text{CLD}]_{\text{s}} \times \text{W}_{\text{fc}} \times \text{D}_{\text{as}} / \text{KOC} / \text{SOC} \quad (\text{Eq.1})$$

- [CLD]<sub>bw</sub> : teneur en chlordécone biodisponible dans la solution du sol, mg/L
- [CLD]<sub>s</sub> : teneur pondérale en CLD, mg/kg de sol sec
- W<sub>fc</sub> : teneur volumique en eau du sol à la capacité au champ, %
- D<sub>as</sub> : densité apparente du sol
- K<sub>oc</sub> : coefficient de partage carbone organique / eau, L/kg
- SOC : teneur en matière organique du sol, %

Le transfert du sol vers la plante des polluants organiques dépend donc de la fraction de chlordécone disponible en solution mais aussi du fonctionnement de la plante. Peu de références sont disponibles sur le transfert de la chlordécone du sol vers les plantes. Néanmoins, depuis le début des années 2000, de nombreux programmes de recherches, menés en Guadeloupe et en Martinique, s'intéressent au comportement de la chlordécone dans l'environnement et notamment à son absorption par les cultures à vocation alimentaire. Il apparaît que la chlordécone est transférée du sol vers la plante et qu'elle contamine les racines de toutes les plantes sans exception. Cependant, les cultures ont des sensibilités variables à la contamination par la CLD. Les différentes cultures peuvent être départagées en trois groupes en fonction de leur sensibilité (Clostre F. et Lesueur-Jannoyer M., 2012) :

a) Les cultures peu sensibles

Les cultures peu sensibles concernent celles dont les teneurs en chlordécone dans les tissus alimentaires sont généralement nulles ou inférieures à  $5\mu\text{g/kg}$  de MF, soit un seuil nettement inférieur à la LMR fixée à  $20\mu\text{g/kg}$  de MF. Elles concernent les arbres et les arbustes ainsi que les plantes maraichères (christophine palissée, chou, haricot, tomate, banane, etc.).

Des études ont été réalisées sur la contamination des bananiers puisqu'il s'agit d'une culture clé de l'agriculture guadeloupéenne. Les parcelles plantées depuis longtemps ayant fait l'objet de traitements à la chlordécone présentent habituellement des taux de contamination élevés. Les analyses ont eu lieu sur des parcelles extrêmement polluées ( $21\text{ mg/kg}$  de sol sec en moyenne) qui ne sont pas représentatives des niveaux de contaminations des sols en Guadeloupe et en Martinique.

Les résultats montrent une contamination importante dans le bas du pseudo-tronc ( $108.5 \pm 80.5$  à  $240.8 \pm 143.4\mu\text{g/kg}$  de MF). Cette contamination diminue vers le haut du bananier avec des contaminations très faibles au niveau des feuilles. Malgré un sol extrêmement pollué, les fruits du bananier ne sont que très rarement contaminés et à des concentrations très faibles ( $< 1\mu\text{g/kg}$  MF).

b) Les cultures intermédiaires

Elles regroupent la canne à sucre, la cive, la laitue et les cucurbitacées. Le transfert maximum sol-plante observé est de l'ordre de 2% dans le cas des cucurbitacées. Ces cultures sont donc à éviter sur des sols dont la contamination est supérieure à  $1\text{mg/kg}$  de sol sec.

En ce qui concerne la canne à sucre, plusieurs essais ont été menés en Martinique sur des parcelles fortement contaminées ainsi qu'en pots. Les résultats obtenus montrent un gradient de contamination de la base des tiges vers l'extrémité des parties aériennes. La dilution de la chlordécone est très importante le long de la tige avec des valeurs allant de  $130\mu\text{g/kg}$  de MF dans les premiers entrenœuds à des concentrations inférieures à  $1\mu\text{g/kg}$  de MF dans le haut des tiges (Lesueur Jannoyer, 2010) (figure 6). Plusieurs études et notamment celle de Bilba et al., 2003 ont montré que la base des tiges de cannes avaient des teneurs en fibres importantes. Ces teneurs élevées pourraient être en lien avec la forte contamination observée dans la base des tiges.



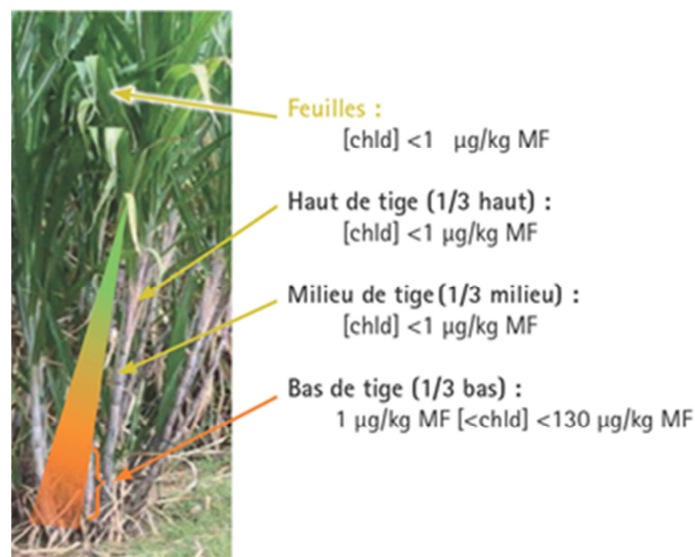


Figure 6 : contamination des tiges de canne à sucre. Données obtenues à la Martinique sur 6 parcelles de 3 types de sol très pollués et 20 répétitions par parcelle. Lesueur-Jannoyer.M, 2010.

D'autre part, le flux de chlordécone dans les produits de transformation de la canne à sucre et de ces déchets a été étudié à partir de 50 échantillons prélevés sur l'ensemble d'une campagne de récolte. Le rhum et le sucre présentent une contamination à la chlordécone quasi-inexistante. La majorité de la contamination se retrouve dans les produits fibreux (bagasse et déchets solides). Ainsi les teneurs retrouvées dans la bagasse sont proches de 20 µg/kg de MF en moyenne contre 40 µg/kg de MF dans les déchets solides.

### c) Les cultures très sensibles

Les cultures très sensibles regroupent l'ensemble des racines et tubercules, du radis à la dachine (madère). Leur forte sensibilité est due à leur développement dans le sol, directement en contact avec la CLD. Deux modes de contamination ont été mis en évidence : une contamination par diffusion mais aussi par contact. La partie consommée est contaminée directement par contact avec la chlordécone contenue dans le sol et les parties aériennes sont contaminées par diffusion au sein de la plante à partir de la CLD captée par les racines. (Y.-M Cabidoche et al., 2006). D'après Cabidoche et al, la contamination des légumes racines serait d'autant plus forte que le rapport surface latérale/volume et le temps de contact sont élevés. Un modèle de contamination relative sol-racine a été proposé sur la base de cette hypothèse. Le transfert maximal sol-plante, c'est-à-dire le ratio entre la teneur observée dans le produit et celle du sol, a été évalué à 20% dans le cas des racines et tubercules. En raison de leur forte sensibilité, ces cultures sont à éviter sur des sols pollués au-delà de 0.1 mg/kg de sol sec.

La molécule de CLD est ainsi absorbée par les racines de l'ensemble des cultures à partir de la fraction biodisponible du sol. Sa hauteur de migration dans la plante semble être variable selon les cultures. Toutefois, d'après les résultats obtenus aux Antilles et d'après différents travaux réalisés sur le transfert sol-plante des xénobiotiques en général (Shone, 1974 ; Briggs, 1982) plusieurs hypothèses peuvent être avancées. La translocation de la molécule des racines vers les parties aériennes s'effectuerait grâce au flux de transpiration. Un composé, se déplaçant avec le flux de transpiration et atteignant les parties aériennes serait accumulé dans

les sites où la transpiration est maximale c'est-à-dire dans les feuilles matures. Dans le cas présent, la molécule de CLD est adsorbée sur des tissus à forte affinité au cours de son trajet puisque seule de très faibles valeurs ont été mesurées dans les feuilles et les fruits situés à une distance importante de la source de contamination. Lorsque ces tissus sont en amont des organes récoltés, ces derniers ne sont que très faiblement contaminés (Bananiers, Arbres fruitiers). Dans le cas contraire ils seront contaminés (nombreux cucurbitacées, légumes racines).

L'accumulation de la molécule dans la végétation constitue donc probablement un point de départ majeur des phénomènes de transfert du polluant le long des chaînes trophiques, conduisant à sa mise en contact avec l'homme et les animaux (Paterson et al., 1990).

Etant donné le caractère nocif de la molécule pour la santé humaine il est indispensable de trouver des systèmes de cultures ou d'élevages compatibles avec le niveau de pollution des sols en remplacement des systèmes qui contribuent à libérer de la CLD dans l'environnement ou dans les aliments.

Bien que la future filière canne-énergie ne soit pas une filière à vocation alimentaire, il s'agit quand même de vérifier que cette nouvelle filière ne contribue pas à la diffusion de la molécule dans l'environnement, principalement lors de la combustion. Pour cela, des travaux ont été nécessaires afin de mieux connaître les teneurs en CLD présentes dans les différentes composantes de la plante et, in fine, dans les produits issus de la combustion (cendres et fumées).

## II. Caractérisation et conséquences des mobilisations en chlordécone par quatre variétés de cannes fibres et une variété de canne à sucre

### II.1. Objectif spécifique

Les dynamiques de la molécule de CLD dans les sols antillais et son transfert dans les plantes n'ont été étudiés que très récemment. La bibliographie concernant ces problématiques reste encore très limitée et récente. L'objet des travaux a donc consisté à évaluer la quantité de chlordécone présente dans les différentes parties de la plante, avec évaluation de la fluctuation éventuelle en fonction des variétés et de l'âge de la plante. Il faudra, in fine, qu'il y ait le moins possible de CLD présente dans la biomasse destinée à la combustion.

### II.2. Matériel et Méthode

Les études menées sur la chlordécone se sont insérées dans un dispositif plus vaste. Les différents prélèvements ont été réalisés sur les essais variétaux V3 et V4.

#### II.2.1. Localisation et description des parcelles expérimentales

Les parcelles expérimentales V3 et V4 sont localisées sur le site du Fromager, à Capesterre-Belle-Eau dans le sud de la Basse Terre (latitude : 16°03' N, longitude : 61°34' W, altitude 100 m). Ces deux essais sont situés sur des sols dont les caractéristiques sont représentatives

de la zone. Les sols sont de type andosol (MO : 7.6 %, ph eau : 6.1, teneur en azote total 2 à 3 mg/kg, P2O5 assimilable : 3.7 mg/100g) et la contamination par la chlordécone dans les 30 premiers centimètres de sol est en moyenne de 8.5 mg/kg de sol sec (annexe n°1).

Chacun des deux dispositifs V3 et V4 comprend 3 répétitions en blocs de Fisher comprenant respectivement 6 et 7 variétés et un témoin. On dispose donc de 21 parcelles élémentaires pour V4 et 22 pour V3 (figure 7). Chaque parcelle est composée de 4 lignes de 6 mètres de long avec un interligne de 1,60 mètres (figure 8). Les blocs sont espacés de 2 mètres afin de faciliter l'accès aux parcelles élémentaires lors des manipulations d'échantillonnage et de mesures destructives. Le matériel végétal a été planté les 18 et 19 avril 2011. Chaque bouture est constituée d'un tronçon effeuillé de 3 yeux. Le reste des boutures disponibles a été planté de part et d'autre de l'essai et permet ainsi de limiter l'effet de bordure.

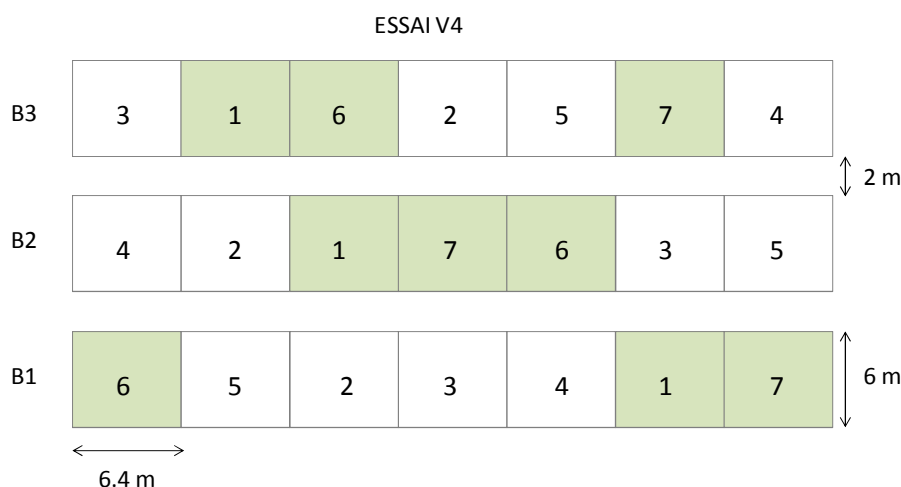


Figure 7 : Configuration de l'essai variétal V4  
1 : R579 / 6 : WI86015 / 7 : WI81456

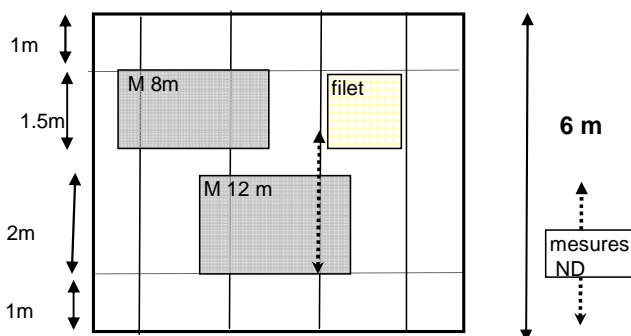


Figure 8 : Schéma d'une parcelle élémentaire et plan d'échantillonnage.

M8m : mesures destructives à 8 mois

M12m : mesures destructives à 12 mois

Filet : récolte des feuilles tombées naturellement sur le filet (1,55m\*1,50m) pour quantifier la biomasse résiduelle.

Dans le cadre de la manipulation sur la chlordécone, les prélèvements ont eu lieu, sur chacun des deux essais, sur les deux meilleures variétés identifiées à partir des mesures non

destructives ainsi que sur un témoin local (tableau 5). Les deux variétés retenues sur l'essai V3 sont la TC8 et la F176 issues de la collection du CIRAD Guadeloupe. Sur l'essai V4 les prélèvements ont eu lieu sur les variétés WI86015 et WI81456 qui proviennent du WICSCBS de Barbade après avoir subi un délai légal de quarantaine de deux ans au CIRAD Montpellier. Les boutures de la variété utilisée comme témoin local, largement cultivé en Guadeloupe, proviennent d'une multiplication de Bologne. Cette variété est bien entendu commune aux deux essais V3 et V4. Les mesures ont été faites à 8 et 12 mois. Sur l'essai V4, un prélèvement supplémentaire a été réalisé à 10 mois avec un focus particulier sur la partie souterraine de la plante.

Tableau 5 : Quelques informations sur les variétés prélevées pour l'analyse. (Chopart 2012).

Essai	Nom variété	Famille	Genre/Espèce	Pays d'origine
V3	TC8	Poacée	Saccharum sp.	Malaisie
	F176	Poacée	Saccharum sp.	Formose
V4	WI86015	Poacée	Saccharum sp.	Barbade
	WI81456	Poacée	Saccharum sp.	Barbade
Témoin	R579	Poacée	Saccharum sp.	Réunion

## II. 2. 2. Prélèvement du matériel végétal

### II.2.2. Evaluation des teneurs en Chlordécone dans différentes composantes anatomiques de la plante et de la hauteur de migration dans des cannes âgées de 8 et 12 mois

Sur chaque parcelle, à trois endroits différents (hors emplacement réservés aux mesures destructives, figure 8) on prélève une canne en coupant à la base de la tige de manière la plus constante possible. Les cannes sont placées sur une bâche pour éviter tout contact avec le sol. Sur chaque tige on sépare les parties dites tiges usinables, et les parties sommitales. La détermination de cette limite est faite de la même façon pour chaque variété pour chaque essai. La limite est située à 4 nœuds en dessous du dernier ochréa visible (photo 3). L'ochréa est la gaine membraneuse à la base de la feuille, et entourant complètement la tige.

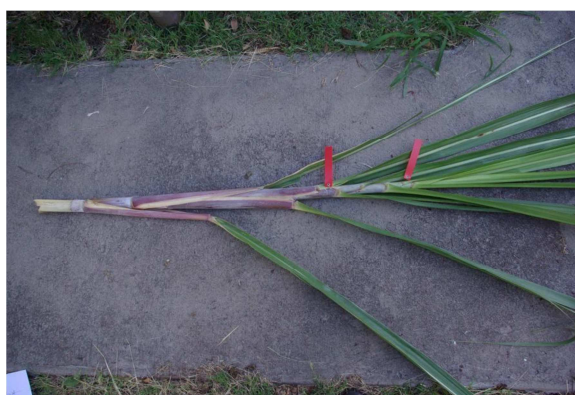


Photo 3 : Visualisation de la limite entre la tige usinable et la tige sommitale. Le dernier ochréa visible se situe au niveau de l'étiquette de la partie haute de la plante et la zone de coupe au niveau de la seconde étiquette, 4 nœuds en dessous. (Chopart 2012).

Les tiges ont ensuite été sectionnées de la manière suivante :

- Entre-nœuds 1 à 5
- Entre-nœuds 6 à 10
- Entre-nœuds 11 à 20
- Entre-nœuds >20

Suite aux résultats obtenus sur les essais V3 à 8 et 12 mois et sur l'essai V4 à 8 mois montrant de fortes concentrations au niveau de la base des tiges, un compartiment supplémentaire des dix premiers centimètres des tiges aériennes a été sectionné sur l'essai V4 à 12 mois. Les dix premiers centimètres de la base des tiges correspondent d'ailleurs à la partie de la tige laissée au champ lors de la récolte. Par ailleurs, des études ont été menées en parallèle par M.Jannoyer en Martinique sur l'absorption de la chlordécone par la canne à sucre et un compartiment approximativement identique avait été étudié, cela permet donc d'avoir des points de comparaisons.

En parallèle, les parties souterraines des tiges correspondantes ainsi qu'un échantillon de racines superficielles (0-20 cm de profondeurs) ont aussi été prélevés.

Sur chaque parcelle, les tronçons de même position sur la tige ont ensuite été regroupés entre eux. On a donc trois tronçons d'un même compartiment par parcelle soit neuf tronçons d'un même compartiment par variété. Sur chaque tronçon on a mesuré la longueur, le diamètre et le poids frais total. Les racines superficielles ont aussi été regroupées par variété sur un même bloc.

Chacun des tronçons a été rincé à l'eau de façon à enlever tout résidu de terre puis pesé en frais avant d'être mis à l'étuve à 60°C pendant 24heures puis à 85°C pendant 48h. L'augmentation de la température s'est faite progressivement pour éviter que le sucre contenu dans les tiges soit extrait sous l'effet de trop fortes températures. Les tronçons ont ensuite été pesés à poids constants avant d'être broyés grossièrement puis finement (broyage 1 mm) en nettoyant bien l'appareil entre chaque échantillon. La figure 9 récapitule les différentes étapes de préparation des échantillons sur la base de l'exemple des tiges.

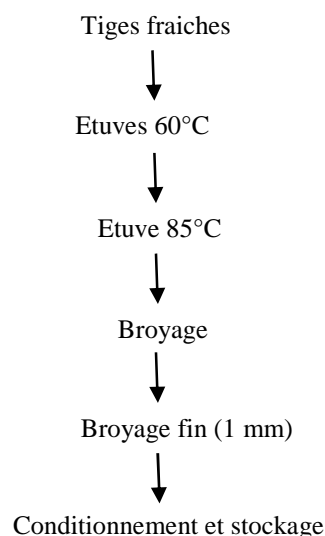


Figure 9 : Différentes étapes de préparation des échantillons, cas des tiges de canne. (Marie 2012).

Le broyage fin à 1 mm a été nécessaire pour pouvoir effectuer des mesures de teneurs en chlordécone ultérieurement. Les échantillons ont été broyés dans l'ordre croissant des teneurs en chlordécone, de l'extrémité des tiges à la base, afin d'éviter toute contamination du matériel végétal.

Après avoir été débarrassées de toute trace de terre, les racines ont été pesées en frais puis mises à l'étuve à 60°C pendant 48 heures avant d'être pesées en sec et broyées finement. Les échantillons de tiges et de racines ont été conditionnés dans des flacons en polyéthylène.

#### II.2.2.2. Evaluation des teneurs en chlordécone dans les composantes anatomiques souterraines et dans les bases des tiges aériennes sur des cannes âgées de 10 mois

Les premiers résultats obtenus en Guadeloupe sur l'essai V3 à 8 mois ont montré qu'il y avait une concentration en CLD bien plus importante dans les racines que dans les parties aériennes. L'objectif de cette manipulation est donc d'évaluer, pour deux variétés de cannes fibres et une canne à sucre, les teneurs en CLD des parties souterraines (racines grosses et fines, tiges souterraines) et dans la base de la tige (dix premiers centimètres).

Sur chaque parcelle on a prélevé :

- La base des tiges aériennes entre 0 et 10 cm de la surface du sol
- Les tiges souterraines : entre la bouture et la surface
- Les racines rattachées aux touffes
- Quatre compartiments de sol, à deux distances et deux profondeurs différentes, contenant les racines grosses et fines des cannes.

#### Prélèvement des racines grosses et fines

La biomasse racinaire a été prélevée par la méthode des monolithes (Chopart, 1999, Chopart, 2004). Cette méthode a permis d'obtenir une estimation de la biomasse racinaire présente entre la surface et 30 cm de profondeur sur les 9 parcelles étudiées dans le but d'évaluer les teneurs en CLD dans les racines et d'estimer les quantités de la molécule par unité de surface. Dans l'interligne, quatre cubes de sol de 15 centimètres de côté ont été prélevés à deux distances du rang de canne, à deux profondeurs 0.-15 cm et 15-30 cm (figure 10) et à deux distances par rapport au centre du rang:

- entre 18 et 33 cm (représentatif de l'espace entre 10 et 40 cm du rang)
- entre 53 et 68 cm (représentatif de l'espace entre 40 et 80 cm du rang)

Les racines situées à proximité immédiate du rang de canne, entre 0 et 10 cm de part et d'autre du rang et entre 0 et 15 cm de profondeur ont été prélevées dans le monolithe de 15 cm de profondeur, 20 cm de largeur et d'environ 30 cm de long qui contenait la touffe de canne puis traitées comme les racines issues des monolithes.

Dans l'horizon sous-jacent, entre 15 et 30 cm de profondeur sous le rang de canne, la biomasse racinaire a été considérée comme identique à celle de la distance 18- 33 cm à la même profondeur.

Les racines dépassant du monolithe de sol lors de l'extraction de celui-ci, ont été soigneusement sectionnées de façon à ne garder que celles contenues dans le volume étudié. Au total 36 monolithes de sol de 15 cm d'arête ont été prélevés.

Les racines ont été extraites des monolithes par tamisage (mailles de 2 mm), sous l'eau, puis lavées minutieusement afin qu'il ne reste aucune trace de terre (Chopart, 2004). Elles ont ensuite été séparées en deux catégories: racines fines (diamètre inférieur à 1mm) et racines grosses (photo 4).



Photo 4 : Echantillon de racines après séparation entre racines fines (diamètre <1 mm) et grosses (diamètre >1 mm). (Marie 2012).

Avant d'être pesées en frais, elles ont été placées sur un papier absorbant pour éliminer la couche d'eau superficielle présente après le lavage. Enfin, les échantillons ont été placés à l'étuve à 60°C pendant 48 heures et pesés à poids constant. Les mesures des poids frais et secs ont permis d'obtenir les teneurs en eau des racines. Les échantillons racinaires des trois répétitions d'une même variété ont été regroupés entre eux car la quantité de matière sèche n'était pas suffisante pour les analyses SPIR et les analyses chlrodécone.

Ces mesures, référencées dans l'espace, ont permis d'obtenir une estimation de la biomasse totale par unité de surface au sol, en canne plantée en rangs de 1,6 mètres. Pour cela, les résultats bruts obtenus à différentes profondeurs et distances du rang ont été pondérés en fonction de leur volume représentatif (figure 10).



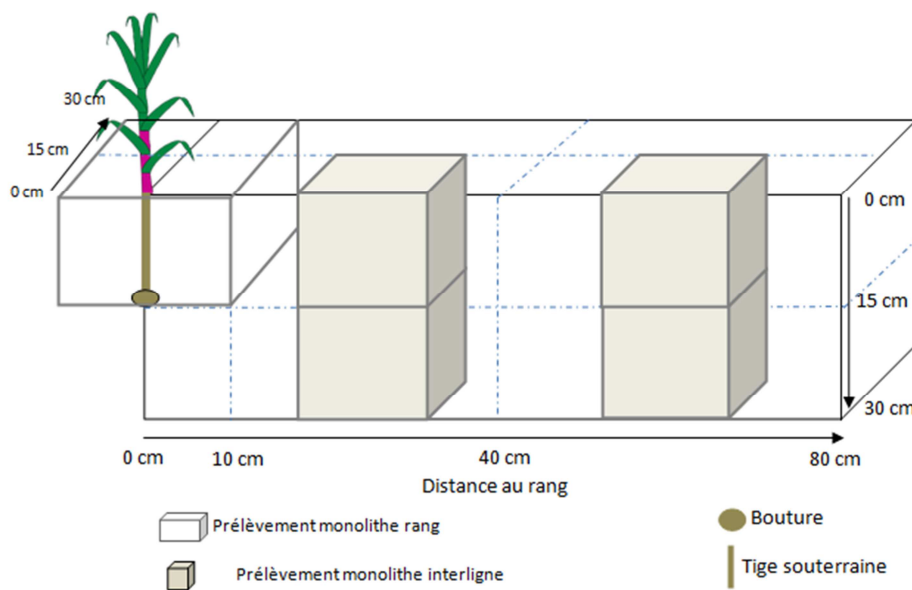


Figure 10 : Position des monolithes de mesures de densité racinaires par rapport au centre du rang et espaces représentatifs de chaque monolithe. (Marie 2012).

Un espace de 15 cm de large et de 80 cm de long, couvrant un demi-interligne sur 30 cm de long et 30 cm de profondeur a été considéré comme l'unité volumique de base représentative, prenant en compte les gradients verticaux, transversaux et longitudinaux, sur 30 cm de profondeur. La biomasse racinaire (en t/ha) a été estimée à partir de cet espace représentatif (annexe n° 2). La biomasse racinaire située en dessous de 30 cm de profondeur n'a pas été évaluée.

Cette estimation a été réalisée afin de pouvoir calculer ultérieurement le rendement racinaire, en t/ha, à partir des résultats obtenus sur les 30 premiers centimètres et d'évaluer les quantités de chlordécone, en t/ha, au sein des différents compartiments étudiés.

#### Echantillons de sol

Chaque échantillon de sol a été pesé directement après le prélèvement. Pour chaque bloc, un échantillon représentatif de 50 grammes a été prélevé pour les mesures d'humidité et un échantillon de 100 grammes a été prélevé pour l'analyse chlordécone. L'échantillon de 50 grammes a été passé à l'étuve à 85°C pendant 48 heures. Les échantillons de 100 grammes de même variété, même répétition et même profondeur ont été regroupés deux à deux et ont été envoyés au laboratoire pour analyse.

#### Prélèvement des racines rattachées aux touffes et base des tiges aériennes

Un prélèvement de touffe de canne, comprenant la partie aérienne et la partie souterraine, a été réalisé sur chaque parcelle. Les dix premiers centimètres des parties aériennes ont été séparés des parties souterraines. Les racines rattachées à la touffe ont été coupées et traitées comme des échantillons racinaires dit près de la touffe. Seules les grosses racines ont été gardées. Les échantillons ont été traités comme précédemment.





Photo n° 5 : Appareil de mesure de la qualité de la biomasse dans le programme REBECCA par spectroscopie dans le proche infrarouge (SPIR). Marie 2012.

## II .2. 3 - Traitement des échantillons prélevés :

- *Analyses par spectroscopie proche infrarouge (SPIR-NIRS)*

La spectroscopie dans le proche infrarouge est une méthode analytique basée sur le principe d'absorption des rayonnements infrarouges par la matière organique. Etant donné que l'absorption des rayonnements est liée à la composition chimique de l'échantillon, on peut estimer cette dernière en mesurant simplement l'absorption de lumière par l'échantillon.

La spectroscopie dans le proche infrarouge se sert des propriétés des liaisons chimiques des molécules pour établir un lien entre l'absorption de la lumière par l'échantillon et sa composition. En effet, les liaisons chimiques sont capables d'absorber des rayonnements correspondants à certaines fréquences particulières.

L'échantillon va être éclairé à différentes longueur d'onde et l'absorption de la lumière à chacune de ces longueurs d'onde va constituer le spectre de l'échantillon. Chaque spectre est donc caractéristique d'un échantillon donné et permet de prédire sa composition.

Le SPIR nécessite toutefois une phase d'étalonnage basée sur des mesures faites en laboratoires. Le calage de ce modèle expérimental permettant d'estimer la qualité de la biomasse a été effectué au CIRAD de Montpellier (D.Bastianelli, L.Bonnal). Cette calibration s'est faite à partir d'analyses chimiques de référence sur plus de 200 échantillons issus du programme REBECCA. La validation est une régression linéaire entre les caractéristiques des échantillons (teneurs en constituants chimiques, etc.) et l'information infrarouge. Parallèlement, un second modèle permettant d'estimer le pouvoir calorifique (PCS et PCI) a été élaboré par l'équipe de l'UMR SELMET à Montpellier. La calibration s'est faite sur les échantillons ayant servis pour la calibration du modèle fibre.

L'ensemble des échantillons issus de la manipulation sur la chlordécone a été passé au Spectromètre (Spectrastar 2400) sous forme de fine poudre (1 mm) (photo 5). Avant chaque phase de mesure, l'appareil a été étalonné avec un échantillon témoin (identique pour toute la durée du projet). Les échantillons ont été placés dans une coupelle rotative traversée par l'ensemble des rayonnements. La quantité d'échantillon doit être suffisante pour recouvrir l'ensemble de la surface de la coupelle de façon à ne pas laisser passer la lumière du jour à travers. Lors de chaque mesure, l'homogénéisation des échantillons a été indispensable en raison de la faible pénétration des rayons lumineux. De plus, chaque mesure a été répétée quatre fois afin d'obtenir le plus de représentativité possible. La composition chimique des différents échantillons a ensuite été prédite directement sur l'appareil de mesure grâce à la phase de calibration initiale.

Cette technique présente de nombreux avantages compte tenu des mesures que l'on souhaite obtenir pour le projet. Les mesures et l'obtention du spectre d'absorption s'effectue beaucoup plus rapidement (quelques minutes) qu'une analyse de composition chimique (quelques jours). De plus, il s'agit d'une technique non destructive ce qui est particulièrement intéressant dans le cadre de cette manipulation puisque les échantillons doivent subir des analyses ultérieures (analyses chlordécone).

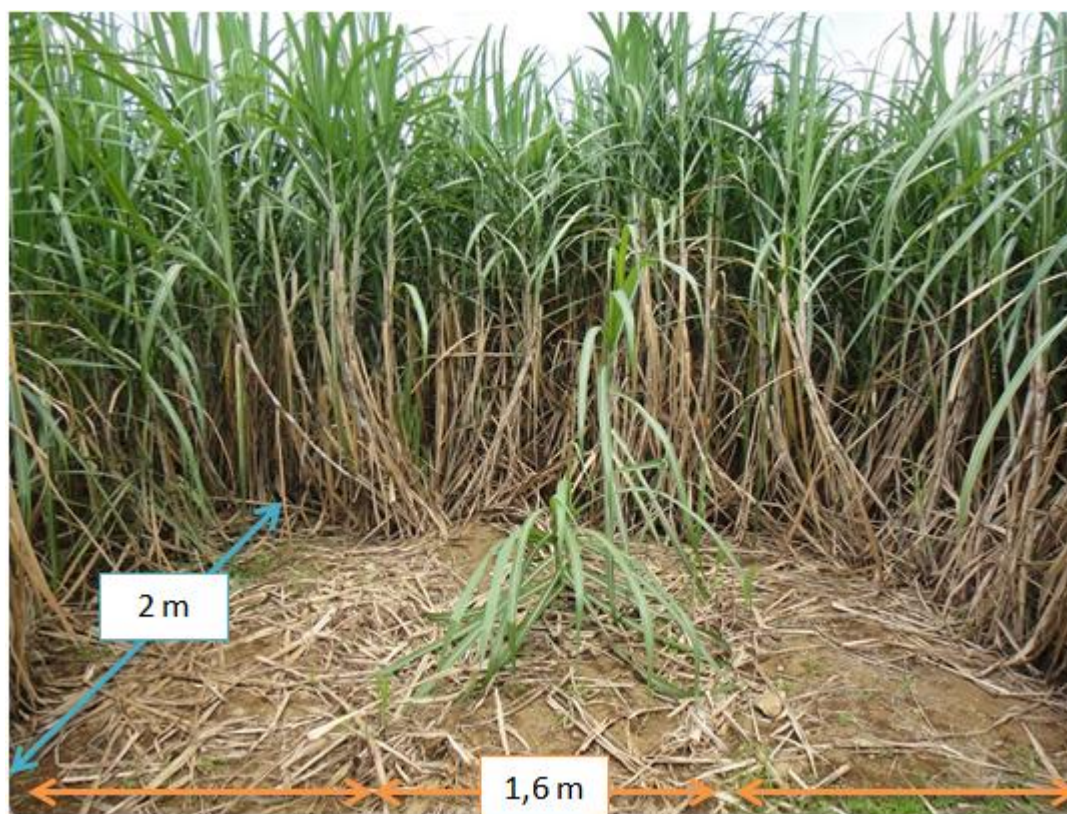


Photo n° 6 : Parcelle après mesure destructive TC8 12 mois. Essai V3. Marie 2012.

Ces analyses SPIR ont été réalisées en premier lieu dans le but de préciser le pouvoir calorifique lié à la teneur en fibres. Elles ont été utilisées, dans le cadre de cette étude sur la CLD pour voir s'il existait ou non des relations entre la composition en fibre des échantillons et leur teneur en chlordécone.

- *Analyses chlordécone*

Les échantillons de sol et des différents compartiments de cannes ont ensuite été envoyés au Laboratoire Départemental de la Drôme (LDA 26). Les molécules recherchées lors de ces analyses sont la chlordécone et son dérivé le 5b hydro chlordécone. Les analyses ont été réalisées au moyen des méthodes CMO MT06 pour les échantillons de sol et par chromatographie liquide haute performance couplée à la spectrométrie de masse (HPLC/MS) pour les échantillons végétaux. Ces méthodes analytiques sont normalisées ou accréditées par le comité français d'accréditation (COFRAC).

#### II.2.4. Evaluation des rendements des différentes variétés étudiées :

Parallèlement à l'évaluation des teneurs en chlordécone, des prélèvements ont eu lieu afin d'évaluer la production et le rendement en biomasse. Ces mesures ont été réalisées au sein des dispositifs expérimentaux variétaux (décrit dans le paragraphe II.1.1) ayant pour objectif de sélectionner les meilleures variétés parmi toutes celles testées. Les échantillonnages destructifs ont été réalisés sur des lignes différentes selon le cycle de culture. Les échantillons ont été prélevés sur les lignes L1 et L2 à 8 mois et sur les lignes L2 et L3 à 12 mois (figure 8).

Les mesures ont été effectuées sur deux mètres après avoir enlevé le premier mètre en bordure de chaque traitement afin de ne pas avoir d'effet de bordure. Les cannes ont été coupées à leur base de la manière la plus constante possible. On s'est intéressé uniquement à la biomasse aérienne puisque la biomasse souterraine n'a pas vocation de combustible ici. Cette biomasse aérienne a été séparée en 4 composantes à savoir les feuilles mortes adhérentes, les feuilles vertes, les amarres et les tiges usinables. Le détail et les résultats concernant les fractions anatomiques autres que les tiges usinables ne seront pas présentés ici. De la même façon, seuls les résultats obtenus sur les quatre variétés de cannes fibre et le témoin local seront présentés.

Le nombre de touffes et le nombre de tiges de cannes prélevées sur une surface connue (2m x 1.60 x 2 lignes) ont été dénombrés (photo 6).

En multipliant le nombre de tiges usinables par m<sup>2</sup> avec le poids de chacune des composantes mesuré lors des prélèvements pour l'évaluation des teneurs en CLD, on a pu obtenir les rendements des différents tronçons étudiés (Tiges souterraines, entrenœuds 1 à 5, entrenœuds 6 à 10 et entrenœuds 11 à 20) et estimer ainsi les quantités de chlordécone par unité de surface, de la même manière que pour la biomasse racinaire. L'ensemble de ces résultats figurent en annexe n° 3.

## II.2.5 Analyse des données

Les dispositifs disposés en blocs randomisés ont permis de réaliser des analyses de variance (ANOVA) afin de vérifier la significativité statistique des résultats. Le seuil de significativité choisi pour les analyses a été de 5%. Ces analyses statistiques ont été réalisées grâce au logiciel statistique XL Stat, version 2010.

## II.3. Résultats

### II.3.1. Evaluation des teneurs en chlordécone dans les différentes composantes de la plante

Les teneurs en chlordécone du sol et des différentes parties aériennes et souterraines de quatre variétés de cannes fibres et de la variété témoin ont été déterminées à 8 et 12 mois et figurent dans les tableaux 6 et 7. Pour une meilleure lisibilité, les teneurs en CLD des tiges souterraines et des différents entrenœuds présentés dans le tableau 6 ont été repris sous forme d'un graphique dans la figure 11. Les teneurs en CLD mesurées dans les échantillons de sol des deux essais sont élevées et représentatives des concentrations rencontrées dans les sols de la zone d'étude (tableau 6).

En raison des difficultés à obtenir une biomasse importante de racines, les échantillons de racines des trois répétitions ont été regroupés ; on ne dispose donc que d'une seule analyse CLD pour trois répétitions.

Tableau 6 : Teneurs en Chlordécone, en  $\mu\text{g/kg}$  de matière sèche du sol, des racines, des tiges souterraines et aériennes sur l'essai V3 à 8 mois (a) et V4 8 mois (b). Les chiffres d'une même ligne suivis d'une même lettre ne sont pas significativement différents suivant le test de Newman-Keuls au seuil de 0.05. (Marie 2012).

(a)

	R579	TC8	F176
Sol ( 0-20 cm)	7087 (a)	5963 (a)	6233 (a)
Racines ( 0-20 cm)	10565	8951	6136
Tiges souterraines	814 (a)	955 (a)	875 (a)
Noeuds 1-5	10,3 (a)	23,3 (a)	14,3 (a)
Noeuds 6-10	1,0 (a)	2,0 (a)	2,7 (a)
Noeuds 11-20	1,3 (a)	2,3 (a)	4,0 (a)

(b)

	R579	WI86015	WI81456
Sol (0-20 cm)	9817(b)	12140(a)	11420(a)
Racines (0-20cm)	9092	7389	7992
Tiges souterraines	599(a)	441(a)	541(a)
Entrenœuds 1-5	28(a)	35(a)	45(a)
Entrenœuds 6-10	2,3(a)	4,7(ab)	6,3(b)
Entrenœuds 11-20	6,0(a)	8,7(a)	8,3(a)



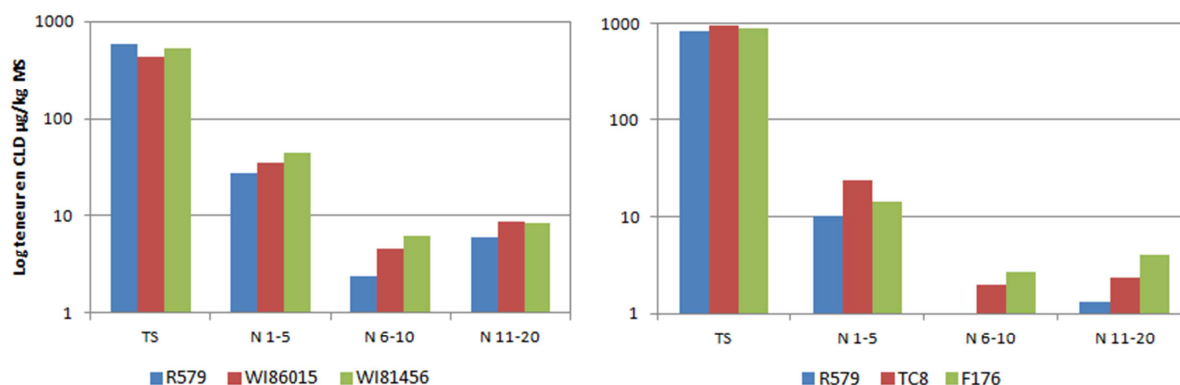


Figure 11 : Teneur en Chlordécone (log  $\mu\text{g/kg MS}$ ) dans les composantes anatomiques des différentes variétés de cannes étudiées sur V4 et V3 à 8 mois. (Marie 2012).

Tableau 7 : teneurs en Chlordécone, en  $\mu\text{g/kg}$  de matière sèche du sol, des racines, des tiges souterraines et aériennes sur l'essai V3 à 12 mois (a) et V4 à 12 mois (b). Les chiffres d'une même ligne suivis d'une même lettre ne sont pas significativement différents suivant le test de Newman-Keuls au seuil de 0.05. (Marie 2012).

(a)

	R579	TC8	F176
Sol ( 0-20 cm)	ND	ND	ND
Racines ( 0-20 cm)	12574	10089	8491
Tiges souterraines	797(a)	450(a)	569(a)
nœuds 1-5	57(a)	44(a)	77(a)
nœuds 6-10	5,3(a)	5,0(a)	2,0(a)
nœuds 11-20	2,0(a)	7,0(a)	1,7(a)

(b)

	R579	WI86015	WI81456
Sol (0-20 cm)	ND	ND	ND
Racines (0-20 cm)	7719	4595	6736
Tiges souterraines	754 (a)	675 (a)	658 (a)
Base tiges (10 cm)	358 (a)	185 (a)	195 (a)
Nœuds 1-5	117 (a)	44 (a)	38 (a)
Nœuds 6-10	12,7 (a)	2,5 (a)	2,5 (a)
Nœuds 11-20	1 (a)	2,5 (a)	2,5 (a)

Il existe un très fort gradient de concentration en CLD entre les racines et les parties supérieures des tiges sur les cannes âgées de 8 et 12 mois. A l'âge de 8 mois, la concentration en CLD dans les parties souterraines des tiges est située entre 15 (V4) et 55 fois (V3) supérieure à celle des premiers entre-nœuds aériens (entre-nœuds 1 à 5), (tableau 6). Les racines concentrent donc une teneur en CLD environ dix fois supérieure à celle des tiges souterraines et entre 200 et 500 fois supérieure à celle des parties basses des tiges, avec une valeur d'environ 7 à 9  $\text{mg/kg}$  (tableau 6).

A l'âge de 12 mois, les tiges souterraines sont en moyenne 10 fois plus contaminées que les premiers entrenœuds des tiges aériennes. Les racines concentrent des teneurs en CLD de 100

(V4) à 200 fois (V3) supérieures à celles des entrenœuds 1 à 5 (tableau 7). A 8 mois comme à 12 mois, il y a donc un gradient extrêmement fort de concentration de CLD entre les racines, qui absorbent et stockent la CLD, et la partie basse des tiges (entre 200 et 500).

Des résultats plus précis ont été obtenus en ciblant les analyses chlordécone sur les composantes anatomiques restant au sol après la récolte. Ces analyses ont été réalisées sur trois variétés de cannes de l'essai V4 à l'âge de 10 mois ainsi que sur des échantillons de sol. Ces résultats figurent dans le tableau 8.

Tableau 8 : teneurs en Chlordécone, en  $\mu\text{g/kg}$  de matière sèche du sol, des racines, des tiges souterraines et aériennes sur l'essai V4 à 10 mois. Les chiffres d'une même ligne suivis d'une même lettre ne sont pas significativement différents suivant le test de Newman-Keuls au seuil de 0.05. (Marie 2012).

		R579	WI86015	WI81456
Sol	0-15 cm	9192(a)	7220(a)	7900(a)
	15-30 cm	3103(b)	11380(a)	13543(a)
Racines fines	0-15 cm	28683	40287	30697
	15-30 cm	49205	54914	60720
Racines grosses	0-15cm	16313	11710	13291
	15-30cm	21031	13756	18500
Racines attachées touffe		10848(a)	6172(a)	5553(a)
Tiges souterraines		1012(a)	1690(a)	1017(a)
Bases tiges (10 cm)		449(a)	358(a)	190(a)

Les teneurs en CLD du sol sont représentatives des teneurs rencontrées dans la zone. Il n'y a pas de différence significative de teneurs en CLD entre les parcelles excepté pour l'horizon 15-30 de la variété R579 qui a une concentration nettement inférieure à celles des autres parcelles et profondeurs pour des raisons non élucidées et sans doute liée à la variabilité aléatoire dans le sol et aux pratiques culturales précédentes.

Il y a un fort gradient de concentration en CLD entre les racines et la base des tiges aériennes avec un rapport moyen de 100 environ. Il existe aussi un écart de concentration de CLD entre les racines (fines comme grosses) situées dans l'horizon le plus profond (15-30 cm) vers celles situées dans l'horizon 0-15 cm de profondeur. Au sein de chaque horizon, il y a un gradient de concentration des racines fines vers les racines grosses (figure 12). Les racines fines sont en moyenne de deux à quatre fois plus contaminées que les racines grosses (tableau 8).

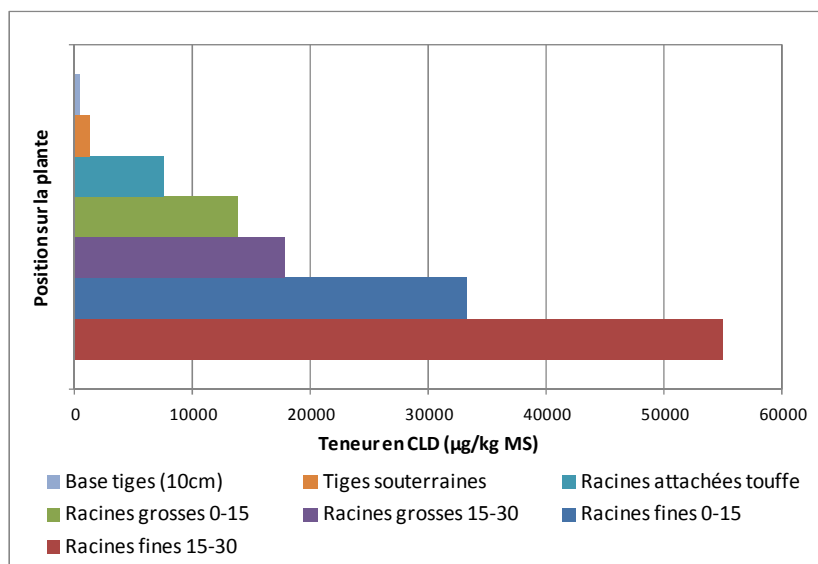


Figure 12 : Gradient de concentration de la molécule de Chlordécone dans les différentes composantes anatomiques des parties restant au sol Moyenne de 3 variétés de cannes (R579, WI86015, WI81456). Essai V4 à 10 mois. (Marie 2012).

Les racines constituent, forcément, la voie d'entrée prépondérante de la molécule dans la plante. D'après les résultats obtenus, la molécule semble pénétrer préférentiellement dans les racines fines qui assurent principalement l'absorption en eau et éléments minéraux. La molécule de CLD, absorbée par les racines fines transite ensuite vers les racines grosses avant d'arriver dans les parties aériennes. Il y a eu une diminution de teneur en CLD dans les racines depuis les racines fines de l'horizon le plus profond jusqu'à celles situées à proximité immédiate des tiges (tableau 8). En effet, la teneur en CLD est passée d'environ 50000 µg à environ 7000 µg des racines fines de profondeur aux racines situées à quelques centimètres de la tige (tableau 8). Ce gradient de contamination semble être lié à la distance parcourue par la molécule depuis son point d'entrée dans les racines. La molécule de CLD se fixe à priori au niveau des tissus à forte affinité rencontrés dans les racines et les différents compartiments, ce qui entraîne une diminution du flux de CLD au cours de son trajet des racines vers les feuilles. Ainsi, plus on s'éloigne de la source d'absorption, plus les concentrations en CLD sont faibles, et les parties aériennes ont des teneurs en CLD beaucoup plus faibles que celles des racines (tableaux 6,7 et 8). De même, la CLD est restée localisée dans les premiers entre-nœuds c'est à dire sur 80 à 100 centimètres, au-dessus les teneurs sont faibles (proche du seuil de détection) et fluctuantes (tableaux 6 et 7).

Le système racinaire paraît donc agir comme un filtre sur la molécule de CLD. Ce rôle semble être lié à la longueur de celui-ci et à sa capacité de fixation. Cette fonction de filtre des racines expliquerait la faible concentration de la molécule dans les parties aériennes de la plante, même dans la partie basse des tiges.



### II.3.2 – Relation entre la teneur en Chlordécone du sol et celle de la plante

Comme déjà indiqué, la teneur moyenne en CLD mesurée dans le sol n'est pas significativement différente d'une parcelle à l'autre sur un même essai (tableau 6). Les échantillons de sol prélevés sur l'essai V4 à 8 mois ont des teneurs en CLD plus élevées que celles de l'essai V3 mais cela ne se répercute pas de façon proportionnelle dans les racines et parties aériennes des cannes (tableau 6). En effet, par exemple la teneur en CLD du sol dans le traitement TC8 de V3 est la moitié de celle du traitement WI86015 de V4 et pourtant les teneurs en CLD des tiges souterraines du traitement WI86015 sont la moitié de celle du traitement TC8 (tableau 6).

Cette absence de proportionnalité peut s'expliquer par la variabilité naturelle des teneurs en CLD dans le sol mais aussi par l'importance de l'extension latérale du système racinaire de la canne. En effet, le système racinaire absorbe de la CLD dans un volume de sol supérieur à celui correspondant aux prélèvements réalisés. On ne peut donc pas établir ici de relation directe entre la concentration en CLD du sol et celle de la plante. Les différences de concentrations en CLD entre variétés devront être examinées avec prudence.

D'autre part, les teneurs en CLD des racines sont supérieures à celles du sol environnant (tableau 7 et 8), les deux étant exprimés en  $\mu\text{g}$  de CLD par  $\text{kg}$  de matière sèche. Cependant, les racines vivantes ont une humidité de plus de 80 %, alors que l'humidité pondérale du sol est située aux environs de 20 à 30 % ce qui diminue, in situ, leur concentration au contact du sol humide. En effet, la teneur en CLD dans les racines à 80% d'humidité était d'environ 7  $\text{mg/kg}$  de MF (données de V4, 10 mois) et celle du sol à 30 % d'humidité était de 6  $\text{mg/kg}$  en moyenne (données de V4 à 10 mois). La concentration en CLD du sol humide était donc approximativement identique à celle des racines humides.

Bien que ce ne soit pas l'objectif du programme REBECCA, afin de mettre en évidence une relation entre les teneurs en CLD du sol et celles de la plante, il aurait fallu réaliser des mesures sur différents types de sols (notamment nitisols et ferralsols) présentant des teneurs en CLD beaucoup plus contrastées. Des expérimentations en pots, auraient aussi pu permettre de voir s'il existait une telle relation en raison d'un contact direct entre les racines et le sol étudié.

### II.3.3 – Relation fibres/chlordécone

Les différences de concentrations entre les différentes parties de la plante et entre les variétés peuvent, à priori, s'expliquer par la composition des tissus. D'après certains auteurs (Lesueur-Jannoyer et al, 2011), il semblerait que, plus la teneur en fibres de la plante est grande, plus la CLD est retenue dans les parties basses. Lors de son passage dans le flux de la sève brute, la molécule de CLD semble se fixer sur des tissus fibreux, à forte affinité en créant un gradient de concentration.

D'après les résultats obtenus dans le cadre du programme REBECCA en Guadeloupe, il semble y avoir une tendance négative entre la teneur en fibres et la teneur en CLD des racines

(figure 13). Ceci peut en partie s'expliquer par le fait que les teneurs moyennes en CLD des racines grosses (15 $\mu$ g/g MS) étaient plus faibles que celles des racines fines (44 $\mu$ g/g MS) malgré une teneur moyenne en fibres plus importante dans les racines grosses que dans les racines fines (76 % contre 68 %). Toutefois, les faibles différences de teneurs en fibres (cellulose, hémicellulose et lignine) des racines fines et grosses ne permettent pas d'expliquer les variabilités de teneur en CLD. Les teneurs en fibres n'expliquent donc pas à elles seules les différences de concentration en CLD dans les racines.

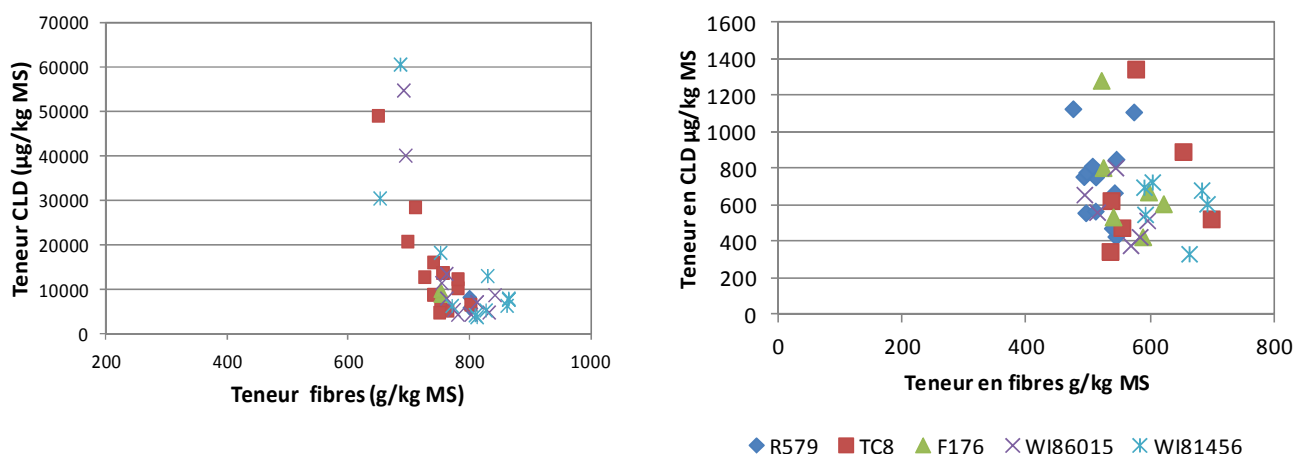


Figure 13 : Relation entre contamination en chlordécone et teneurs en fibre des parties souterraines. A gauche : racines des essais V3 (8 et 12 mois) et V4 (8,10 et 12 mois). 42 données.  $R^2 = 0,5$ . A droite : tiges souterraines des essais V3 (8 et 12 mois) et V4 (8 mois et 12 mois). (Marie 2012).

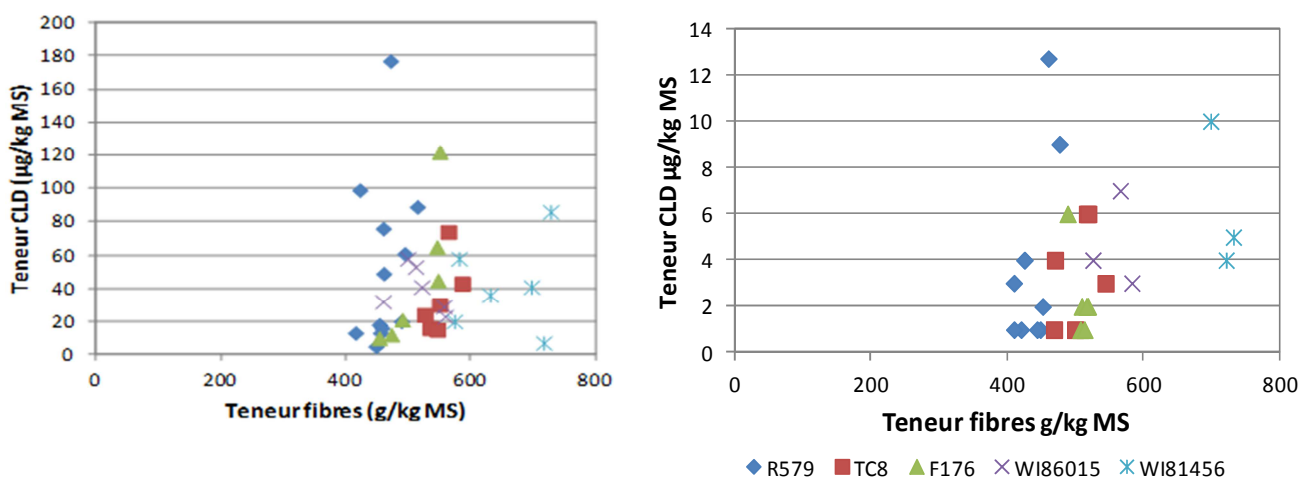


Figure 14 : Relation entre contamination en chlordécone des entrenœuds et teneurs en fibres des entrenœuds. A gauche : entrenœuds 1 à 5, 36 données. A droite : entrenœuds 6 à 10, 28 données. Données issues des essais V3 (8 et 12 mois) et V4 (8 mois et 12 mois). (Marie 2012).

En revanche, dans les tiges souterraines ou aériennes, la forte variabilité de teneur en CLD ne s'explique pas par la variabilité de teneurs en fibres (figures 13 et 14).

Concernant les variétés, il ne semble pas y avoir de relation claire entre les teneurs en CLD et en fibres dans les tiges aériennes et souterraines, même pour la variété WI81456 qui a un taux de fibres supérieur sans effet sur la teneur en CLD. De même, la variété R579 la moins

fibreuse ne concentre pas moins de CLD que les autres (figures 13 et 14). Il ne semble exister aucune relation directe entre la teneur totale en fibre et la teneur en CLD dans les tiges.

L'étude plus précise des teneurs en hémicellulose, cellulose et lignine n'a pas apporté non plus d'élément de réponse aux différentes concentrations de CLD mesurée. Des variations de teneurs en fibres trop peu contrastées entre les différentes variétés pourraient expliquer l'absence de relation visible entre les concentrations en CLD et les teneurs en fibres (annexe n° 4).

### II.3.4 – Evolution des teneurs en Chlordécone dans les différentes composantes anatomiques entre 8 et 12 mois

Sur l'essai V3, la teneur en CLD dans les racines était très légèrement supérieure à celle mesurée à 8 mois. Cependant cette variation n'est pas significative et n'est pas vérifiée sur l'essai V4 (figure 15). Les variations de concentrations dans les tiges souterraines sont également faibles. La concentration dans les parties souterraines est donc restée relativement constante entre 8 et 12 mois.

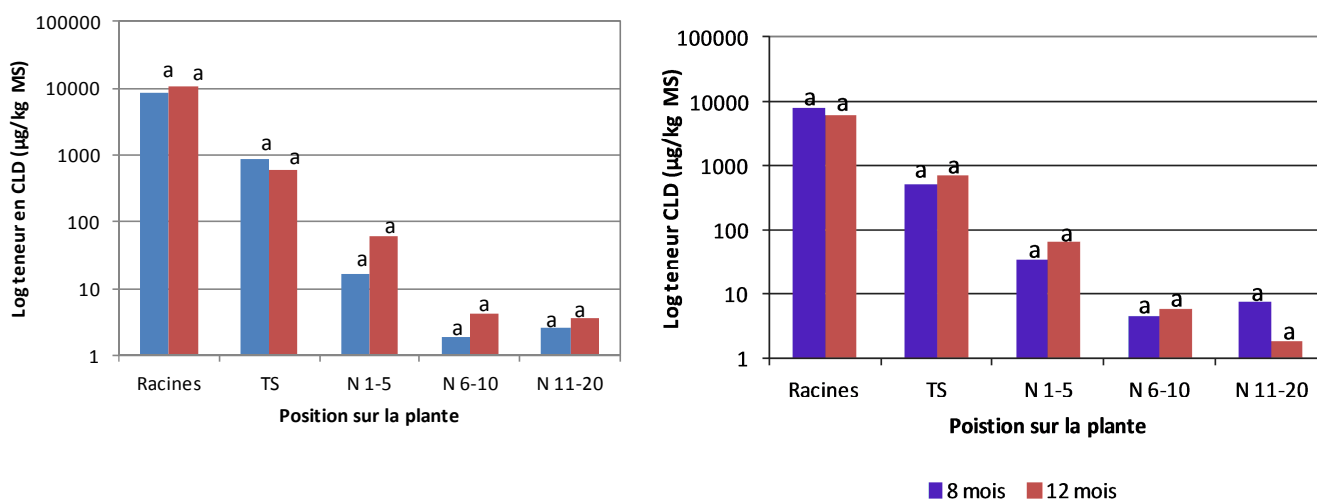


Figure 15 : Evolution des concentrations en chlordécone (en µg/kg de PS, échelle logarithmique) dans les différents compartiments des cannes étudiées entre 8 et 12 mois. A gauche : essai V3. A droite : Essai V4. (Marie 2012).

Les faibles valeurs de CLD dans les parties supérieures des tiges rendent les résultats difficiles à analyser. Néanmoins, sur les deux essais, entre ces deux dates il y a eu une faible augmentation de la concentration de la CLD dans les entrenœuds 1 à 5 (figure 15).

Il semble donc exister, entre 8 et 12 mois, une légère modification des teneurs en CLD le long des tiges, la concentration dans les racines restant, elle, plus ou moins constante.

### II.3.5- Estimation des quantités de Chlordécone par unité de surface cultivée

La transformation des concentrations de CLD en quantités de CLD exprimées en poids de CLD par unité de surface de culture (figure 16) visent à mieux cerner les risques environnementaux liés à cette molécule. Elles sont obtenues à partir des concentrations par unité de biomasse et de la biomasse par m<sup>2</sup>. Pour les racines, les calculs ont été effectués à partir des valeurs de biomasse racinaire par unité de surface au sol obtenues à 10 mois sur l'essai V4 (cf I.2.2) car les quantités de biomasse racinaire par unité de surface n'ont pas été estimées à l'âge de 8 mois et 12 mois.

Dans un premier temps, le calcul des teneurs en CLD, en g/ha, dans l'ensemble des composantes de la canne à 8 comme à 12 mois, montre que ces dernières ont été très peu variables (2,7 mg/ha à 8 mois contre 2,9 mg/ha à 12 mois) (tableau 9). Entre 8 et 12 mois il n'y aurait donc plus, ou très peu d'absorption de CLD par les racines.

Tableau 9 : Teneur totale en chlordécone en mg/m<sup>2</sup> dans l'ensemble des composantes des cannes à 8 et 12 mois sur les essais V3 et V4. (Marie 2012).

	Essai V3			Essai V4			moyenne
	R579	TC8	F176	R579	WI86015	WI81456	
CLDtot plante mg/m <sup>2</sup> (8 mois)	3,4	2,9	2,0	3,0	2,3	2,7	2,7
Ecart type	0,14	0,17	0,09	0,03	0,02	0,11	
CLDtot plante mg/m <sup>2</sup> (12 mois)	4,3	3,3	2,9	2,8	1,7	2,5	2,9
Ecart type	0,24	0,10	0,09	0,27	0,05	0,16	

D'autre part, les calculs plus précis des quantités de CLD présentes dans les différents compartiments des cannes montrent que la quantité de CLD localisée dans les racines d'une culture de canne à sucre est d'environ 25g/ha. Il apparaît donc très clairement que les racines constituent le lieu de stockage de la CLD. En effet, cette quantité de CLD contenue dans les racines est très nettement supérieure à celle des tiges souterraines, qui concentre 2 g de CLD par hectare de culture, et encore plus à celle située dans les tiges aériennes (environ 0,036 g/ha dans les entrenœuds 11 à 20).

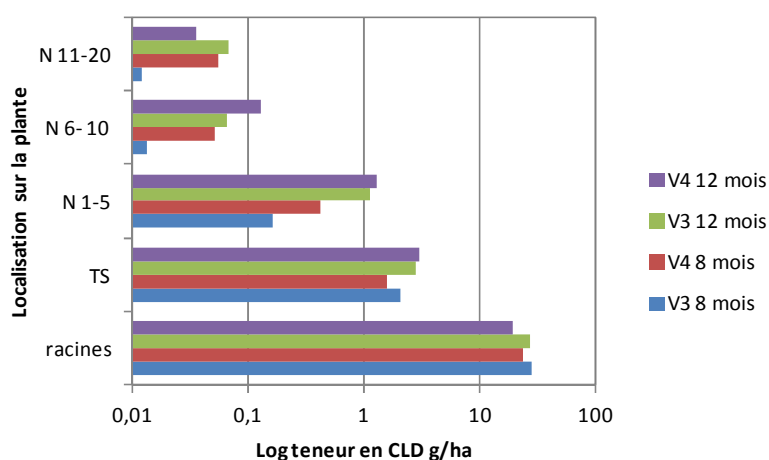


Figure 16 : Essais V3 et V4. Teneurs en chlordécone (en g/ha, échelle logarithmique) dans différentes parties de la plante sur des cannes âgées de 8 mois et 12 mois. (Marie 2012).

Bien que la biomasse des racines soit nettement inférieure à celle des parties aériennes, elle constitue le compartiment dans lequel est stockée la plus grande quantité de chlordécone. Ainsi, la CLD reste dans sa plus grande partie dans le sol.

Ces résultats permettent d'apporter des premiers éléments de réponses sur les transferts et la répartition de la chlordécone. D'un point de vue pratique, la diffusion de la molécule dans l'environnement semble donc être limitée, il reste maintenant à étudier le devenir de ce pesticide dans les produits de combustions.

D'un point de vue plus scientifique, ces résultats pourraient permettre d'aboutir à une première modélisation partielle du transfert du pesticide dans le système sol-eau-plante.

### II.3.6. Vers une modélisation du transfert de la CLD dans le système sol-eau-plante

Les résultats précédents amènent à penser que le prélèvement de la molécule de chlordécone par la canne à sucre pourrait être conditionné par deux types de facteurs, des facteurs externes liés aux paramètres environnementaux et des facteurs internes liés à la constitution de la plante, notamment celle des racines.

Plusieurs hypothèses relatives à l'absorption de la CLD ont été émises à partir des résultats précédents. Ces hypothèses ont ensuite permis d'établir des équations permettant de modéliser simplement les transferts de la CLD dans le système sol-eau-plante.

#### Calcul de la CLD biodisponible

Comme vu précédemment, seule la chlordécone en solution est susceptible d'être absorbée par la plante. D'après Cabidoche et Lesueur-Jannoyer (2011), la fraction biodisponible peut être calculée grâce à l'équation suivante:

$$[CLD]_{bw} = [CLD]_s \times W_{fc} \times D_{as} / K_{oc} / SOC \quad (Eq.1)$$

Avec :

- $[CLD]_{bw}$  : teneur en chlordécone biodisponible dans la solution du sol, par unité de volume de sol en mg de CLD par litre de sol ( dm<sup>3</sup>)
- $[CLD]_s$  : teneur pondérale en CLD, mg/kg de sol sec
- $W_{fc}$  : teneur volumique en eau du sol à la capacité au champ, %
- $D_{as}$  : densité apparente du sol
- $K_{oc}$  : coefficient de partage entre le carbone organique du sol et l'eau interstitielle L/kg
- $SOC^9$  : teneur en carbone organique du sol, %

L'équation (1) a permis de calculer un ensemble de valeurs moyennes de la fraction de CLD bio-disponible dans les sols du dispositif d'étude du Fromager. Ces valeurs ont été calculées en prenant en compte les caractéristiques de ces andosols, (Carib Agro, 2010) :

---

<sup>9</sup> Soil Organic Carbon

- [CLD]<sub>s</sub> : fonction des traitements (tableau 10)
  - $W_{fc}$  : 0.5
  - $D_{as}$  : 0.80
  - $K_{oc}$  : 17500
  - SOC : 0.04 (Résultats parcelle Capesterre belle eau, Carib Agro, 2010)
- \* ce qui signifie, d'après Cabidoche et Lesueur-Jannoyer 2011 qu'à l'équilibre, il y a 17500 fois plus de CLD fixée à un kg de matière organique que contenue dans la solution du sol

La chlordécone est donc présente à de faibles concentrations dans la solution du sol et cette concentration est sensible aux variations de teneurs en carbone organique (tableau 10). Pour la suite de notre étude on gardera la valeur obtenue pour une teneur en carbone organique de 4 % (teneur mesurée en 2010 sur les parcelles de la zone d'étude, Carib Agro 2010) soit une concentration en CLD biodisponible de 0.005 mg/L en moyenne.

Tableau 10: Quantité de chlordécone biodisponible sur les essais V3 et V4 en fonction des teneurs en carbone organique (3, 3.5, 4 et 5 %). (Marie 2012).

	Essai V3			Essai V4		
	R579	TC8	F176	R579	WI86015	WI81456
CLD sol mg/kg SS	7,09	5,96	6,23	9,82	12,14	11,42
CLD <sub>bw3</sub> (mg/L sol)	0,0054	0,0045	0,0047	0,0075	0,0092	0,0087
CLD <sub>bw3,5</sub> (mg/L sol)	0,0046	0,0039	0,0041	0,0064	0,0079	0,0075
CLD <sub>bw4</sub> (mg/L sol)	0,0040	0,0034	0,0036	0,0056	0,0069	0,0065
CLD <sub>bw5</sub> (mg/L sol)	0,0032	0,0027	0,0028	0,0045	0,0055	0,0052

### Estimation de la CLD absorbée à partir de la CLD bio disponible

Plusieurs hypothèses pourraient expliquer la quantité de CLD absorbée dans la plante à partir de la CLD biodisponible. Ces hypothèses sont les suivantes :

- la CLD bio-disponible est absorbée avec l'eau donc le flux de masse dépend de l'ETR
- la CLD bio-disponible a une concentration fixe dans le sol entre 0 et 30 cm, par unité de volume de sol, mais sa concentration dans l'eau du sol dépend de l'humidité du sol dans ce volume
- l'absorption de CLD commence environ un mois après plantation, quand les parties aériennes et les racines commencent à se développer
- l'humidité du sol a été suffisante, au cours de la période considérée pour assurer une ETR proche de l'ETM. Mais elle n'est pas toujours restée à la capacité au champ, elle a été généralement inférieure.
- l'absorption d'eau se fait principalement dans la zone où se trouve la CLD (0-30 cm)

A partir de ces hypothèses simplificatrices, il est possible de modéliser les quantités de CLD absorbée grâce aux équations n° 2 et 3. Chaque jour l'entrée de CLD dans la plante peut être estimée par :

$$[\text{CLD}]_{\text{p/j}} = [\text{ETR}]_{\text{j}} \times \text{CLD}_{\text{so}} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\text{CLD}_{\text{so}} = [\text{CDL}]_{\text{bw}} \times \text{HR}_{\text{j}} \quad (\text{Eq. 3})$$

Avec :

$[\text{CLD}]_{\text{p}}$  : CLD absorbée par la plante par unité de surface de sol,  $\text{mg}/\text{m}^2/\text{j}$

$[\text{ETR}]_{\text{j}}$  : Volume d'eau ( et de solution de CLD) absorbée par la plante en  $\text{L}/\text{m}^2/\text{jour}$

$\text{CLD}_{\text{so}}$  : CLD dans la solution du sol

$[\text{CLD}]_{\text{bw}}$  : CLD bio disponible,  $\text{mg}/\text{L}$  ( $\text{mg}$  de CLD par litre de sol)

$\text{HR}$  : humidité relative du sol entre 0 et l'humidité à la capacité au champ (= eau utile disponible dans la zone racinaire / eau utile dans la zone racinaire).

Dans les conditions locales, les valeurs suivantes ont été retenues

$[\text{ETR}]_{\text{j}}$  : Le volume d'eau moyen absorbé par la plante en  $\text{L}/\text{m}^2/\text{j}$  a été estimé à  $4 \text{ L}/\text{m}^2/\text{jour}$ . L'estimation de valeurs plus précises est en cours à partir du modèle de bilan hydrique probe (Chopart et al., 2009) en ne retenant que la composante transpiration, sans l'évaporation et exprimées en  $\text{L}/\text{m}^2/\text{j}$  à partir des  $\text{mm}/\text{j}$ .

$[\text{CLD}]_{\text{bw}}$  : la valeur utilisée a été celle de l'équation 1 ( $0.005 \text{ mg}/\text{L}$ ). Cette valeur correspond à une masse de CLD par volume de sol.

$\text{HR}$  : La valeur retenue ici est la moitié de la capacité au champ (0.5).

Avec ces valeurs, la quantité de CLD absorbée par la plante entre 45 et 250 jours a été estimée à  $2.05 \text{ mg}/\text{m}^2$  ce qui est très proche des  $2,7 \text{ mg}/\text{m}^2$  de chlordécone absorbé par les cannes à l'âge de 8 mois.

Ces résultats, bien qu'approximatifs pour le moment, laissent à penser que le flux d'eau (ETR) serait un des principaux moteurs de l'absorption de la CLD dans la plante. Néanmoins ces équations permettraient d'expliquer les quantités de CLD absorbées entre 45 et 250 jours après plantation mais ne sont pas représentatives de celles absorbées entre 250 et 365 jours. Un autre facteur rentrerait à priori en jeu entre 250 et 365 jours.

Relations entre absorption de la CLD, teneur en CLD biodisponible dans le sol et caractéristiques du système racinaire

Afin de mieux comprendre les mécanismes ayant lieu au niveau du système racinaire, les longueurs des racines fines et grosses ont été calculées (figure 17) à partir des mesures de biomasse (Marie et Chopart 2012) et en utilisant la relation existant entre le poids et la longueur racinaire de canne à sucre (Chopart et al., 2010) (figure 17). Les surfaces de contact entre les racines et le sol ont également été calculées à partir de ces longueurs racinaires et des périmètres respectifs de chaque type de racines (figure 18).

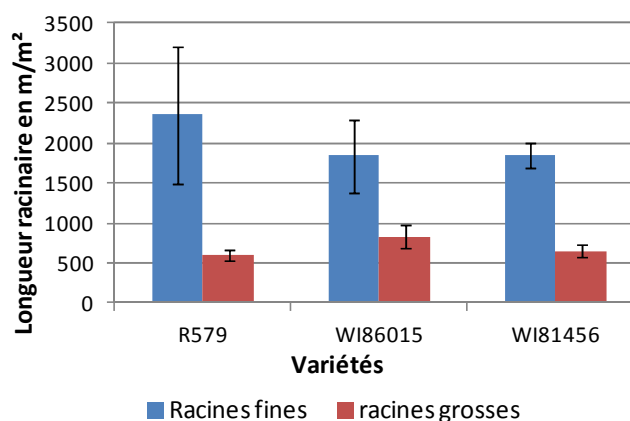


Figure 17 : Moyenne des longueurs des racines fines et grosses en m/m² dans l'horizon 0-30 cm chez trois variétés de cannes. Essai V4, 10 mois. (Marie 2012).

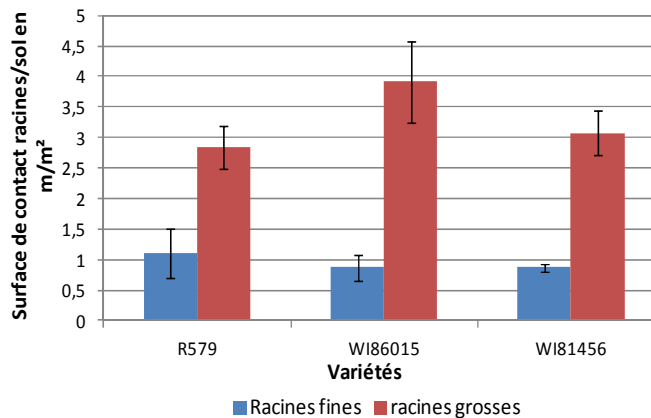


Figure 18 : Moyenne des surfaces de contact racines/sol des racines fines et grosses en m/m² dans l'horizon 0-30 cm chez trois variétés de cannes. Essai V4, 10 mois. (Marie 2012).

La concentration en CLD plus forte dans les racines fines que dans les racines grosses (tableau 8) aurait pu s'expliquer par une plus grande surface de contact racines/sol pour les racines fines mais ça n'est pas le cas (figure 18).

Outre l'activité racinaire (qui n'a pas été mesurée ici), la longueur racinaire totale plus importante dans le cas des racines fines pourrait donc être un des facteurs explicatifs de leur teneur en CLD plus élevée. Comme cela a été vu précédemment, la concentration en CLD dans la solution du sol est très faible, sa biodisponibilité dans les andosols du dispositif expérimental a été évaluée à 0.005 mg/L de sol d'après la formule de Cabidoche et Lesueur-



Jannoyer (2011). D'autre part, la CLD est très peu mobile. On peut donc supposer que les racines absorbent uniquement la CLD biodisponible présente dans le rhizocylindre (zone, autour des racines de biodisponibilité des éléments pour la plante) et qu'une fois la CLD en solution absorbée dans ce volume de sol, il n'y a plus de CLD disponible (figure 19). Sur la figure 19, il n'y a plus de molécule de CLD présente autour de la grosse racine car les molécules présentes dans le rhizocylindre ont déjà été absorbées par cette racine.

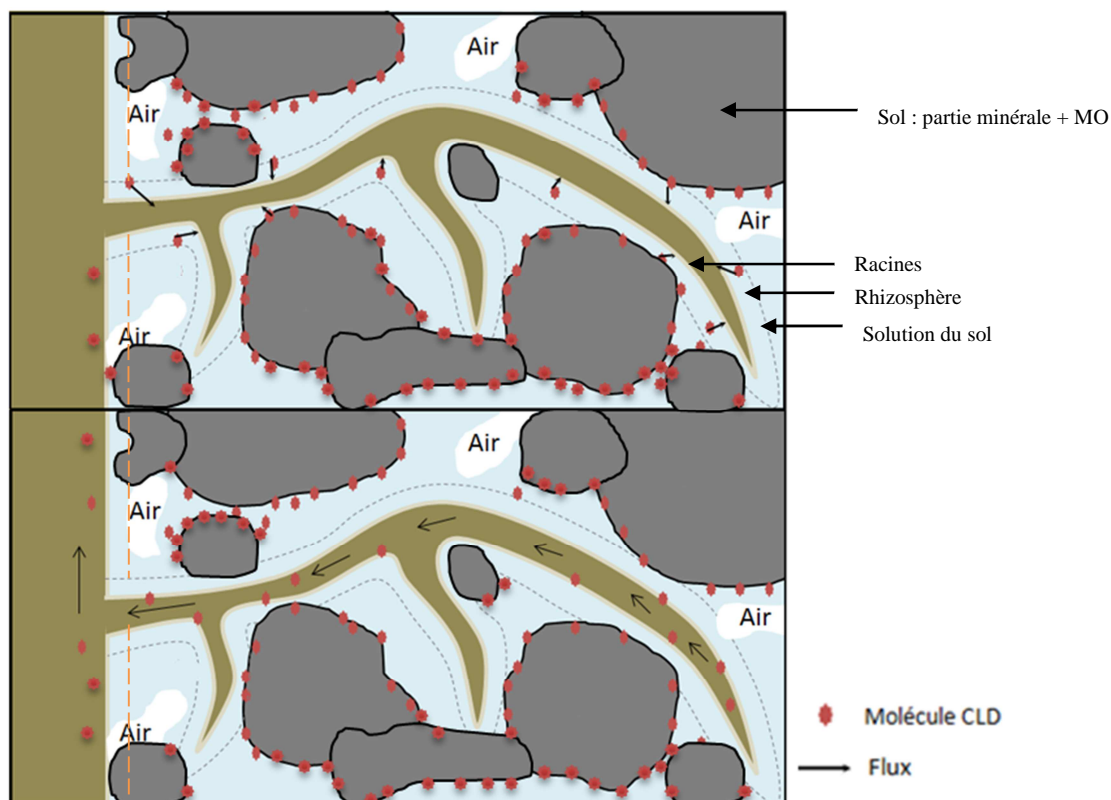


Figure 19 : Absorption de la molécule de CLD biodisponible dans la solution du sol par les racines. (Marie 2012).

Etant donné que les racines fines sont plus courtes que les racines grosses, elles possèderaient un nombre d'apex (zone de croissance) par unité de poids et de longueur plus important que les racines grosses. Ce serait donc ces racines qui, en explorant de nouveaux sites chargés en CLD, absorberaient la molécule biodisponible dans la solution du sol (figure 19).

L'absence d'augmentation des concentrations en CLD dans les cannes entre 8 et 12 mois (250 et 365 jours) pourrait alors s'expliquer mécaniquement par un arrêt de la croissance des racines fines situées dans l'horizon de sol le plus contaminé par la CLD (0-30 cm) ou alors par une absorption d'eau seulement en profondeur en dessous de la zone chlordéconée. Cette dernière hypothèse va être testée par une modélisation du bilan hydrique grâce au logiciel de modélisation PROBE (Chopart et al 2009). Un ralentissement de l'activité racinaire pourrait aussi être à l'origine de l'absence d'augmentation des teneurs en CLD entre 8 et 12 mois toutefois le dispositif mis en place ne permet pas de l'évaluer.

Le flux de transpiration semble donc être le moteur principal de l'absorption et de la circulation du pesticide dans la plante. Néanmoins, le système racinaire joue aussi un rôle

important puisqu'il s'agit de la zone d'entrée du pesticide et il pourrait de plus expliquer l'absence d'augmentation des concentrations en CLD entre 8 et 12 mois.

#### II.4 - Discussion :

Une étude assez proche a été menée à la Martinique sur des cannes âgées de 8 mois cultivées en pots. Les résultats (Cabidoche et al, 2012) font état de teneurs plus élevées qu'en Guadeloupe avec des valeurs d'environ 5000 µg/kg dans les premiers entrenœuds. Ces différences peuvent s'expliquer par les conditions expérimentales en particulier le fait qu'à la Martinique l'étude a été faite en pots sur des cannes mono-tiges et en Guadeloupe en conditions de plein champ sur des cannes normales. De ce fait, il y a eu une moindre dilution de la molécule de CLD au niveau du plateau de tallage dans le cas des cannes cultivées à la Martinique. Néanmoins, dans les deux cas, il existe un gradient de concentration important depuis les racines jusqu'à l'extrémité supérieure des tiges. En tenant compte de ces différences de conditions expérimentales, les résultats du programme REBECCA sont donc à la fois concordants et complémentaires avec ceux obtenus à la Martinique.

En Guadeloupe (programme REBECCA) comme à la Martinique (Cabidoche et al., 2012), les résultats les plus innovants concernent la concentration de CLD dans la partie souterraine des tiges et les racines. En effet, de par leur longueur, elles jouent à priori un rôle de filtre sur la molécule de CLD. Etant donné que les racines restent au sol et se dégradent après la récolte de la canne, la plus grande partie de la contamination n'est pas exportée. D'autre part, les parties aériennes les plus contaminées, c'est-à-dire les dix premiers centimètres des tiges aériennes, restent elles aussi sur la parcelle puisqu'elles correspondent approximativement à la hauteur de coupe. Les composantes les plus contaminées par la CLD n'étant pas exportées, les quantités de CLD brûlées lors de la combustion seront donc relativement faibles, ce qui limitera l'impact environnemental de cette filière. Ces résultats doivent toutefois être extrapolés avec prudence puisqu'ils ont été obtenus dans des conditions spécifiques à la zone d'étude (caractéristiques du sol notamment) et sur un cycle de culture seulement.

Néanmoins, les résultats obtenus en Guadeloupe et à la Martinique permettent d'apporter des premiers éléments de compréhension concernant l'absorption de la CLD par la canne et ouvrent la voie à une éventuelle modélisation de son transfert dans le système sol-eau-plante sous réserve d'être confirmés sur des cannes en repousse.

La modélisation de l'absorption de la CLD par la canne à sucre permettrait, par simulation, d'examiner les répercussions des variations des caractéristiques du milieu (notamment teneur en MO du sol, bilan hydrique) sur les teneurs en CLD dans les différentes composantes. Au préalable, il faut d'abord disposer d'un nombre suffisant de données. Ceci permettrait de limiter les mesures expérimentales parfois lourdes et coûteuses à mettre en place.

Un travail lourd de modélisation de l'absorption de la CLD à partir des résultats obtenus en Guadeloupe et aussi à la Martinique est en cours. Il devrait durer quelques mois et déboucher d'ici un an environ à la soumission d'un article dans une revue internationale. Le pas de temps dépasse donc largement, celui de ce stage de fin d'étude. Mais ce stage a permis de contribuer significativement à fournir des données et à alimenter la réflexion.

### III. Evaluation des teneurs en chlordécone dans les cendres issus de la combustion de bagasse

#### III.1. Objectif spécifique

Les cendres issues de la combustion ont pour vocation d'être épandues sur les parcelles de cannes, principalement dans les systèmes de culture canne-fibres pour servir de fertilisants. En effet une étude faite à la Réunion a montré l'intérêt agronomique des cendres (Chabalier et Babamoussa, 1999). Chabalier et Babamoussa ont montré que les cendres constituaient un produit particulièrement intéressant en apportant des éléments jouant sur l'entretien du pH du sol (4,1 % de CaO et 4,3 % de MgO) mais aussi des éléments de croissance pour les cultures (3,1 % de potasse et 1 % de phosphore) améliorant ainsi les rendements dans le cas d'apports raisonnés. Les variations de compositions chimiques des cendres sont principalement dues à la différence de composition des sols sur lesquels ont été cultivées les cannes. Une autre étude plus récente réalisée en 2000 par l'INRA (Cabidoche et al.) sur les cendres issues de l'usine du Moule en Guadeloupe aboutit à des résultats proches. Cette étude a mis en évidence que ces cendres étaient riches en calcium (6%) ainsi qu'en potasse (4 à 5 %) et dans une moindre mesure en phosphore (1 à 2 %). Leur teneur en métaux lourds est faible et n'entraîne pas de risque pour l'environnement. Un test fait sur igname et maïs montre que ces cendres peuvent avoir un effet positif sur les rendements.

Néanmoins, dans la zone polluée à la chlordécone, il paraît important de vérifier l'innocuité de l'épandage de ces cendres afin que ces dernières ne participent pas à la dispersion de la pollution.

Après avoir évalué la répartition de la CLD dans les différentes composantes de la biomasse de canne, il a donc paru indispensable d'étudier le devenir de cette CLD dans les cendres afin de vérifier que la CLD ne s'y retrouvait pas. Pour cela, une combustion expérimentale a été réalisée à la distillerie Bologne à partir de canne issues du site du Fromager. Toutefois, la canne combustible n'étant pas disponible en quantité suffisante, la combustion a été réalisée en utilisant de la bagasse de canne à sucre conventionnelle. Même si ce produit n'est pas identique à celui qui sera brûlé dans la phase industrielle de production d'électricité, cette combustion permet d'obtenir des premiers éléments de réponse sur l'impact environnemental lié à la combustion de la CLD. Etant donné qu'il s'agit d'une filière énergie renouvelable il est indispensable d'évaluer son impact environnemental, qui se doit d'être moins important que celui d'une filière conventionnelle.

#### III.2. Matériel et méthode

Les cannes ont été prélevées sur une parcelle à teneur en chlordécone élevée (10,9 mg/kg de sol sec) sur le site du Fromager à Capesterre-Belle-Eau. La coupe de la canne a été réalisée le 28 et le 29 février. Des chargements provenant de Grande Terre ont aussi été déchargés à Bologne le même jour mais mis de côté afin d'éviter tout mélange des cannes.

Quatre prélèvements de bagasse ont été effectués juste avant la combustion et un échantillon de cendres a été prélevé pendant la combustion, donc issus du lot de bagasse prélevée. Après avoir été pesés, les quatre échantillons de bagasse ont été mis à l'étuve (48h, 80°C). Les échantillons secs ont ensuite été pesés puis broyés finement avant d'être analysés par la technique de la spectrométrie proche infrarouge (SPIR). Les analyses des teneurs en CLD de la bagasse et des cendres ont été réalisées au Laboratoire Départemental de la Drôme, spécialisé dans la mesure de cette molécule.

### III.3. Résultats et discussion

Les résultats des analyses SPIR et des teneurs en CLD des différents échantillons de bagasse et de cendres sont présentés dans les tableaux 11 et 12.

Tableau 11: Quelques propriétés de la bagasse obtenues sur 4 échantillons. Les teneurs en fibres, matière minérale et sucres sont exprimés en % de matière sèche.

	TMS	MM	Hémicell.	Cellulose	Lignine	Sucres	PCI
R1	51	4,6	28,5	41,3	9,5	9,1	16711
R2	46	4,9	30,5	40,6	9,1	8,6	16962
R3	44	4,6	29,1	40,8	9,2	12,3	16622
R4	40	3,9	26,8	41,1	9,9	11,0	16855
Moy.	45	4,5	28,7	41,0	9,4	10,2	16787

Les valeurs mesurées de teneurs en matière sèche (45% en moyenne) sont légèrement inférieures aux valeurs courantes qui vont de 50 à 60 % (Archimède et al. 2011). Les teneurs en hémicellulose et cellulose correspondent à celles de littérature citée par Pouzet (2011) avec des teneurs en fibres de la bagasse variables selon les variétés et les conditions de culture :

- Lignine : 18-25 %
- Cellulose : 32-58 %
- Hémicellulose : 24-32 %

La teneur en lignine de la bagasse utilisée est plus faible que les chiffres cités ci-dessus, montrant que l'on a utilisé une canne à sucre peu fibreuse.

Tableau 12 : Teneur en chlordécone en µg/Kg de poids sec de bagasse et de cendre issu de la manipulation combustion à Bologne.

Echantillon	Répétition	Teneur en CLD
Bagasse	R1	79
	R2	59
	R3	51
	R4	53
Moy.		60,5
Cendres		0

Les teneurs en chlordécone contenues dans la bagasse ont été de 60µg/kg de MS en moyenne, soit environ 3 fois plus élevées que celles retrouvées dans les tiges de cannes qui sont de 20 µg/kg MS en moyenne (Chopart, 2012). D'après Jannoyer et al., (2011), le sucre extrait des cannes ne contient pas de CLD, l'essentiel de la contamination se retrouve dans les sous produits fibreux (bagasse et déchets solides). La plus faible teneur en sucre de la bagasse (10% de la MS contre 34%<sup>10</sup> pour les tiges) ainsi que la plus faible teneur en eau, permettent donc d'expliquer les fortes teneurs en CLD mesurées. La bibliographie relate des teneurs en CLD de 20 µg/kg de matière fraîche dans la bagasse (Clostre F., Lesueur-Jannoyer M., 2012) ce qui correspond à une contamination de 44 µg/kg de MS si l'on considère une teneur en matière sèche moyenne de 45 %. Cette valeur reste inférieure à celle trouvée dans le cadre du programme REBECCA.

Les cendres issues de la combustion de la bagasse ne contiennent pas de CLD malgré une teneur en CLD du sol importante (tableau 12). Le point de sublimation de la chlordécone étant de 350°C et la combustion ayant eu lieu à 1000°C, la molécule s'est complètement décomposée. Ces résultats de teneurs en chlordécone dans les cendres sont donc conformes avec ce qui était attendu. Toutefois, ceci devra être confirmé avec des cannes entières fibreuses, quand elles seront disponibles, mais il n'y a pas de raison évidente que le résultat soit différent.

Les résultats, obtenus sur les cendres de bagasse de canne à sucre cultivée en milieu chlordéconé, offrent des premiers éléments de réponse sur les teneurs en CLD dans ces cendres. Ces cendres pourraient donc, à priori, être valorisées par épandages sur les parcelles de canne à sucre, en priorité dans les systèmes de canne combustible d'où elles proviennent. Les modalités et conditions de ces épandages de cendres issues de cannes combustibles restent à être définies ultérieurement.

---

<sup>10</sup> Données issues des analyses SPIR sur V3 à 12 mois. Moyenne de la teneur en sucre en % de matière sèche des tiges des variétés T1, T6 et T7.

## Partie III. Discussion générale sur la mise en place d'une filière canne combustible

---

### I. Impact de la mise en place de cette filière canne énergie sur l'environnement

#### I.1. Aspect environnemental lié à la présence de la chlordécone

Si les mécanismes exacts d'absorption et de transferts de la molécule n'ont pas encore été élucidés, les résultats obtenus dans le cadre du programme Rebecca permettent d'apporter des premiers éléments en réponse à l'impact environnemental de la filière. La molécule de CLD reste concentrée et stockée dans le système racinaire de la canne qui semble jouer un rôle de filtre. Ainsi, seule une très faible quantité de CLD est transférée vers les parties aériennes. Au-delà des dix premiers centimètres de la base des tiges aériennes, qui n'ont pas vocation à être brûlées, les concentrations sont faibles et fluctuantes.

Les amarres et feuilles adhérentes (vertes et sèches) sont aussi considérées actuellement comme de la biomasse combustible. Pour des raisons budgétaires aucune analyse de CLD n'a été effectuée sur ces composantes anatomiques. Cependant, de par les résultats obtenus et de par leur répartition sur l'axe de la tige, la teneur moyenne en CLD de ses composantes peut à priori être estimée comme étant relativement faible. Jannoyer et al., rapportent des teneurs en CLD inférieures à 1 µg/kg de matière fraîche dans les feuilles vertes soit approximativement 3 µg/kg de matière sèche en considérant une teneur moyenne en matière sèche des feuilles vertes de 30% (Chopart JL, 2012a). Cette teneur est cent fois plus faible que celle mesurée dans les dix premiers centimètres des tiges aériennes (332 µg/kg MS).

D'autre part, cette composante (amarres et feuilles confondues) représente 30% de la biomasse combustible totale avec un rendement moyen en matière sèche de 15 t/ha (Chopart JL, 2012a). La quantité maximale de CLD contenue dans cette composante peut donc être estimée à 0,045 g/ha de culture. Cette valeur est probablement surestimée puisque les amarres correspondent à la partie sommitale des tiges et sont donc, à priori, moins contaminés que les entrenœuds 11 à 20. Les calculs ont été faits sur les deux composantes (feuilles et amarres) confondues dans un souci de simplification et d'absence de données plus précises.

De ce fait une quantité minime de CLD devrait se retrouver dans la biomasse destinée à la combustion.

D'autre part, lors de la combustion il n'y a aucune trace de CLD dans les cendres. Les cendres, pourront donc être épandues sur les parcelles sans réapprovisionner le stock en CLD du sol.

Il existe cependant une forte contrainte liée à la pluviosité élevée en saison des pluies à prendre en compte car elle joue sur la teneur en eau de la biomasse et donc sur le temps de séchage avant combustion. Cette forte pluviosité entraîne aussi un ameublissement des sols

entraînant des dégradations de sols lors de la récolte ainsi que l'arrachage des souches entières. Une fraction de la biomasse racinaire, relativement faible, se retrouve alors mélangée avec la biomasse combustible. Etant donné qu'il s'agit du compartiment concentrant la plus grande quantité de CLD il pourrait être intéressant de réaliser une estimation de cette biomasse afin d'évaluer les quantités de CLD supplémentaire que cela représente.

## I.2. Exportation de la biomasse et équilibre organique des sols

Dans le cadre du programme Rebecca et de la mise en place de cette nouvelle filière canne-fibres, il a été décidé que l'ensemble des composantes aériennes de la plante étaient destinées à la combustion excepté les feuilles tombées au sol naturellement avant la récolte (FT). Toutefois, l'utilisation ou non de cette dernière composante peut être débattue car elle constituerait une source de biomasse énergétique supplémentaire, c'est pourquoi les quantités de cette biomasse ont été évaluées dans le cadre du programme REBECCA afin de pouvoir trancher sur son utilisation ou non.

Cette biomasse a été évaluée entre 1 et 2 tonnes de matière sèche par hectare selon les variétés (Chopart JL et Marie P, 2012) dont plus de la moitié est déjà en phase de décomposition. Dans un premier temps il a été décidé de laisser cette fraction de biomasse au sol car son utilisation comme combustible nécessiterait un ramassage mécanique post récolte qui, outre, son coût risquerait d'endommager les jeunes repousses de canne. De plus, si la canne est cultivée sur un sol pollué à la CLD, il est très probable que les feuilles, en contact avec le sol et sa faune et en début de décomposition, contiennent des teneurs élevées en CLD.

D'autre part, même si les quantités sont faibles, elles participent au maintien de l'équilibre organique du sol. L'apport organique est réalisé par les racines, les tiges souterraines et la base des tiges aériennes (10 premiers centimètres). En admettant que le système racinaire se renouvelle chaque année et que les tiges souterraines ne sont produites qu'à chaque replantation (tous les 5 ans), il est possible d'estimer la quantité de biomasse restant au sol et la contribution de chaque compartiment au maintien de l'équilibre organique (Annexe n°5). Ainsi, la fraction des feuilles tombées au sol représente 15% de la biomasse totale laissée au sol. Comme elle est située en surface elle est complémentaire de celle des racines. Cette biomasse paraît donc indispensable au maintien du taux de matière organique du sol dans les futurs systèmes intensifs de culture de canne combustible (ou du moins au ralentissement de la baisse du taux de MO). Dans le cas où cette composante des feuilles naturellement tombées au sol ne suffirait pas à maintenir l'équilibre organique du sol, il n'est pas exclu que la biomasse actuellement considérée comme biomasse combustible soit sujette à des reconsidérations.

Dans le cadre de ce programme, il n'est pas possible de répondre à cette question qui nécessiterait des recherches élargies sur le sujet. Si la biomasse considérée en premier lieu changeait de statut et restait au champ pour assurer l'équilibre organique du sol cela entraînerait une diminution de matière première à destination de la centrale électrique. Toutefois, un apport insuffisant en MO entraînerait à terme une dégradation de la structure



des sols et de la fertilité, ce qui conduirait inévitablement à une perte du rendement en matière première et donc à une perte de rendement énergétique mais surtout, à un risque de libération de la molécule de CLD dans la solution du sol puis à sa diffusion dans l'environnement.

Cette réduction de la fertilité des sols pourrait être corrigée en partie par des apports d'engrais chimiques mais étant donné que le programme s'inscrit dans les dynamiques du développement durable il n'est pas question ici d'augmenter les quantités d'intrants chimiques par rapport à la filière canne à sucre conventionnelle. Plusieurs études, réalisées sur la base du bilan carbone dont celle de Sharma et Campbell (2003), ont confirmé la part importante des fertilisants dans les émissions de GES (leur fabrication représente 30 % des émissions). D'une manière générale ces études ont montré une réduction des impacts environnementaux (GES, eutrophisation, écotoxicité) par l'utilisation du compost ou résidus de cultures.

D'autre part, cette forte teneur des sols en MO participe à la fixation de la CLD dans les premiers centimètres du sol. En effet, de par sa forte affinité pour la matière organique des sols, la CLD est retenue dans les horizons de surfaces. Un appauvrissement des sols en MO pourrait conduire au relargage de la molécule de CLD dans les nappes souterraines et eaux environnantes. La molécule pourrait même se retrouver dans les eaux potables. Compte tenu de son impact sur la santé humaine, il est important de limiter au maximum la diffusion de cette molécule dans l'environnement. Il apparaît donc nécessaire que des études complémentaires soient effectuées afin d'évaluer la durabilité de ce système de culture. Les travaux réalisés dans le cadre du programme REBECCA ont permis d'évaluer les quantités de biomasse restituées au sol après chaque récolte de cannes. Cette première quantification locale pourra par la suite servir de point de départ à des études plus précises sur le stock organique du sol à partir des modèles existants.

### I.3. Analyse du cycle de vie (ACV) de la filière canne-électricité

Le programme REBECCA vise à substituer l'utilisation des énergies fossiles par une énergie renouvelable ayant, à priori, un impact environnemental moindre. Néanmoins les différentes étapes de production d'électricité à partir de la biomasse génèrent inévitablement des impacts sur l'environnement qu'il convient d'évaluer étant donné que le programme s'inscrit dans les objectifs du développement durable. Ces impacts peuvent être évalués au moyen d'une étude d'impact environnemental qui permettra de justifier ou non le soutien au développement de cette filière et de permettre une prise de décision stratégique sur le long terme.

Dans le cadre du programme REBECCA, l'outil REBECCA-ACV a été développé (Merle, 2012) afin d'analyser l'impact environnement de la filière selon différents scénarii. Il s'agit d'une analyse de cycle de vie qui est une méthode permettant de réaliser un inventaire complet afin d'évaluer et de quantifier tous les impacts environnementaux pertinents et d'identifier les points les plus critiques dans la chaîne de production.

L'étude s'est appuyée sur la base de données européenne Ecoinvent (Frischknecht, 2007) respectant les recommandations de l'International Standards Organisation (ISO 14000-14044). Cet outil a permis dans un premier temps de calculer le profil environnemental de



l'électricité issue de la canne combustible selon deux scénarii relatifs à la puissance industrielle (5 et 10 MW). Afin de comparer l'efficacité de chacun de ces scénarii, l'ensemble des indicateurs calculés ont été ramenés à une unité fonctionnelle, le kWh électrique. L'étude de ces deux scénarii a été réalisée sur la totalité de la filière depuis la production des intrants jusqu'à la production d'électricité avec un itinéraire technique fixe (annexe n° 6) et à partir de 5 principaux paramètres (gisements (ha), rendement (tonnes de MF/ha), variété, part de fuel, facteur d'émission directe N<sub>2</sub>O) (Merles, 2012).

Le profil environnemental des deux scénarios a été établi à partir de 7 indicateurs choisis parmi les 20 indicateurs de la méthode Recipe Midpoint (figure 20), (Merles, 2012).

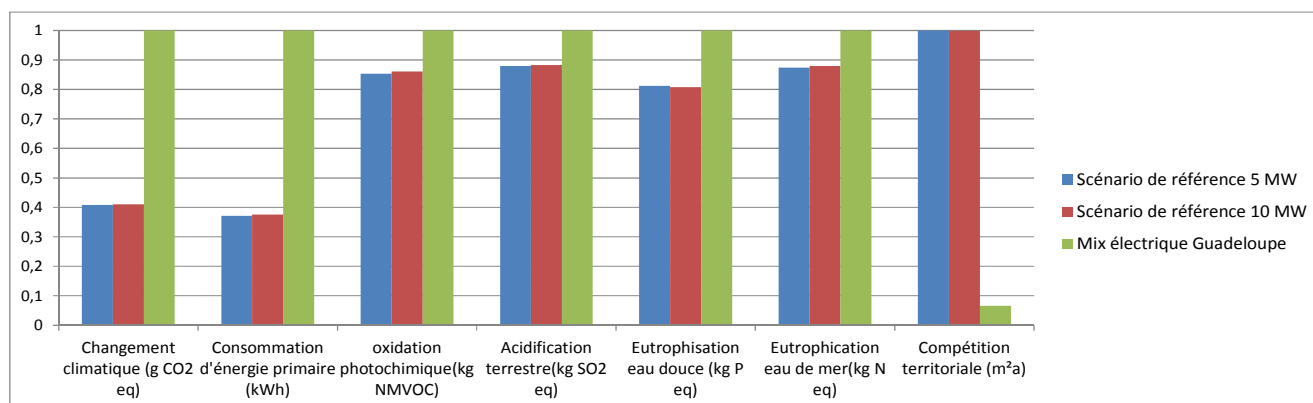


Figure n° 20 : Comparaison des profils environnementaux des scénarios 5MW, 10MW et du mix électrique Guadeloupe. Chacun des indicateurs choisis présente un maximum établi à 1 et porté par l'une des 3 options évaluée. Merles.T, 2012.

Ainsi, d'après T.Merles (2012) l'ACV permet de confirmer, à partir des 7 indicateurs sélectionnés, que la production d'un Kwh électrique à partir de la nouvelle filière canne-énergie aurait un impact environnemental moins important que celui de la filière conventionnelle actuelle (mix électrique). Cette filière canne-énergie permettrait un gain sur la majorité des indicateurs étudiés, notamment un gain sur les émissions de gaz à effet de serre de 15 900 et 31 625 tonnes équivalent CO<sub>2</sub> chaque année en adoptant les scénarii 5 ou 10 MW (Merles, 2012). Le cas de l'indicateur « compétition territorial » révèle une perte sur l'emprise du territoire (qui s'élève respectivement de 487 et 974 ha pour chaque scénario) et qui montre un des inconvénients de la nouvelle filière. En effet, la production électrique d'origine agricole nécessite des surfaces nettement supérieures à celles nécessaires celles nécessaire actuellement pour un site industriel seul (Merles, 2012).

L'outil REBECCA-ACV permet donc d'avoir une idée sur les tendances d'évolution du bilan environnemental en fonction des différents scénarii. Toutefois, cet outil ne saurait prétendre à une évaluation précise des gains relatifs à la filière électrique actuelle mais seulement à donner des ordres grandeurs. En effet, de nombreuses hypothèses de départ ont été formulées et influencent les résultats. Des voies d'amélioration sont donc possibles en jouant sur la qualité des données notamment en contexte Guadeloupéen (Merles, 2012).

## II. Dépendance énergétique

Dans le cadre du programme REBECCA, il est prévu de construire une centrale électrique d'une puissance nette de 5 MW. D'après le partenaire industriel (Cann'elec développement) cette centrale permettrait de produire 37500 MWh par an en fonctionnant 7j/7 et 24h/24 sur 45 semaines par an, soit un total de 7500 heures en moyenne par an (tableau 13). Il est prévu un mois et demi d'arrêt de l'unité de production par an pour maintenance (Cann'elec développement).

Tableau 13 : Données concernant la population guadeloupéenne, la consommation électrique par foyer en KWh/an ainsi que le nombre de foyers pouvant être alimentés par 5 Mw. (1) Cann'elec développement, (2) Insee 2012, (3) Prerure 2008.

Puissance nette de l'unité (1)	5	MW			
Nombre d'heures de fonctionnement/an (1)	7500	heures			
Kwh produits / an	37500	MWh	soit	37500000	kWh
Nombre d'habitants par foyers (2006) (2)	2,6	habitants			
Population guadeloupe (2009) (2)	401 554	habitants	soit	154444	foyers
Conso électrique par foyer (2006) (3)	4250	MWh			
Nombre de foyers alimentés par 5 MW	8824		soit	5,7	%

Etant donné qu'un foyer guadeloupéen consomme 4250 KWh/an, la mise en place d'une centrale électrique de puissance 5 MW couvrirait les besoins en électricité d'environ 9000 foyers soit 6 % des foyers guadeloupéens (tableau 13).

Toutefois, d'après les calculs (prudents) du partenaire industriel, une puissance de centrale de 5 MW correspond à une mobilisation de biomasse de cannes de 46 000 tonnes de matière sèche par an soit environ 144 000 tonnes de biomasse fraîche à 32 % de matière sèche (Cann'elec développement) (tableau 14).

Tableau 14: surface nécessaire pour alimenter la centrale électrique

Puissance nette de l'unité	5	MW
Biomasse nécessaire en MS (1)	46000	t de MS
Biomasse nécessaire en MF (2)	143750	t de MF
Rendements t de MF/ha (3)	200	t/ha
nombre d'hectares nécessaires	719	ha

(1) Cann'elec développement 2012

(2) Teneur en MS de 32 %

(3) Rendement des cannes entières excepté les feuilles sèches tombées au sol, Chopart, 2012b.

Le rendement moyen de la biomasse fraîche totale a été évalué à environ 200 t/ha (Chopart, 2012b). Afin d'obtenir la biomasse nécessaire pour alimenter en continue l'unité de production

il faudrait disposer d'approximativement 700 ha de cultures. Or, d'après le rapport économique de Lejars C et Fusillier JL (2012), les surfaces disponibles ont été estimées entre 500 et 600 ha en prenant en compte les contraintes du milieu (critères économique, topographiques, climatiques, agronomiques). Ainsi, pour atteindre le taux de rentabilité interne fixé par le partenaire industriel (11% garanti sur 25 ans) il faudrait trouver environ 10 000 tonnes de matières sèches supplémentaires.

### III. Perception de la filière canne-fibre par les acteurs agricoles

Plusieurs facteurs détaillés précédemment (Partie I, II.1), à priori favorable au développement d'une filière canne-fibre en Guadeloupe, laissent à penser que cette dernière pourrait être facilement adoptée par les agriculteurs. Cependant, comme le fait remarquer ROSSI (2000), « *Les expériences vécues par les paysans soumis depuis deux ou trois générations aux projets successifs de développement leur ont appris à se méfier d'une série d'innovations parfois contradictoires, toujours présentées comme techniquement sûres et économiquement intéressantes, se modifiant au gré des changements de contextes politico-économiques ou administratifs* ». Des écarts entre les « logiques paysannes » et les « logiques des opérateurs du développement » peuvent exister sans pour autant être contradictoires et amènent à constater qu'il existe des divergences au niveau de la hiérarchisation des différents critères lors de la mise en place d'un projet. Afin d'identifier ces éventuelles divergences il est indispensable de se questionner sur la perception des agriculteurs par rapport à cette nouvelle filière.

Pour évaluer le potentiel d'adoption de la filière canne-énergie des enquêtes visant à identifier le ressenti (positionnements, attentes, opportunités, craintes) des principaux acteurs agricoles ont été réalisées par l'INRA fin 2011 (rapport final volet économie environnement, Blazy et al., 2012).

Ces entrevues ont été réalisées auprès des acteurs de la zone concernée, à savoir, auprès de l'organisation des producteurs de bananes de Guadeloupe (LPG) et des acteurs de la filière canne à sucre (CUMA côte au Vent, Chambre d'Agriculture de la Guadeloupe, UDCAG, IGUACANNE) (Rapport final volet économie environnement, Blazy et al., 2012).

Concernant les acteurs de la filière banane, l'argument de la contamination de terres par la CLD n'a pas eu de poids. Selon eux, la banane constitue une des meilleures stratégies de production face aux restrictions relatives à la mise en culture et à la commercialisation des produits agricoles cultivés en zones contaminées, imposées par les décrets préfectoraux (Blazy et al., 2012). Comme mentionné précédemment, la culture de la banane est peu sensible à la contamination et les concentrations présentent dans les fruits se situent en dessous des seuils de détections. Cependant, ces acteurs ne sont pas réfractaires pour autant, ils se sont même montrés intéressés par cette filière canne énergie (Blazy et al., 2012).

Selon la législation, les plantations de bananes doivent respecter une période de deux ans sans banane entre deux cycles de culture afin d'interrompre le cycle des ravageurs (nématodes, charançon noir du bananier principalement) affectant cette culture. Actuellement, les parcelles sont alors mises en jachères (80%) ou, dans 20 % des cas la canne à sucre est introduite

comme plante de rotation (Blazy et al., 2012). La canne à sucre est une culture non hôte des nématodes qui permet ainsi de lutter contre ce problème. Parallèlement, elle permet au planteur d'avoir un revenu complémentaire puisque, contrairement à d'autres plantes de couvertures, il s'agit d'une culture de rente. L'introduction de la canne fibre dans la rotation avec la banane Cavendish a été considérée comme une alternative intéressante car elle permet potentiellement d'écourter la durée de la présence de la canne dans la rotation (Blazy et al., 2012).

Cette piste mérite d'être approfondie et des tests d'efficacité sur les effets de différentes variétés de cannes fibres sur les populations de nématodes pourraient être mis en place. En revanche, comme dit précédemment, très peu de résidus de culture sont laissés sur la parcelle lors de la récolte des cannes-fibres et il est possible que cela engendre des évolutions au niveau de la fertilité des sols, préjudiciables à la culture de rotation.

Au sein de la filière canne à sucre, les opinions sont divergentes en fonction des acteurs. La représentation des planteurs de l'UDCAG regrette de ne pas avoir été associée plus tôt au programme REBECCA. Néanmoins, ils voient cette nouvelle filière comme une alternative permettant aux agriculteurs d'être moins dépendants des fluctuations de l'industrie sucrière (Blazy et al., 2012). Certains planteurs considèrent d'ailleurs que l'alternative canne-fibre doit être accessible à tout producteur et pas seulement à ceux situés dans le sud de la Basse-Terre (Blazy et al., 2012).

D'un autre côté, d'autres acteurs agricoles pensent que la production énergétique n'est pas l'avenir de la canne et qu'il faut se recentrer sur la production de rhum car elle aurait des perspectives excellentes en termes de marché à l'export en raison de sa forte valeur ajoutée (Blazy et al., 2012). Or, la production d'alcools forts sur le territoire national est régit par un quota ce qui limite très fortement ce débouché à l'heure actuelle, d'autant plus que les contingents annuels sont régulièrement atteints (Chambre de commerce et d'industrie de Pointe à Pitre, 2009).

L'acceptation de ce nouveau débouché est, à priori, très fortement dépendant du prix de revient de la canne-fibre. Selon un des principaux dirigeants de la CUMA "Côte au Vent", premier opérateur de récolte œuvrant au Sud Basse-Terre, il faudrait pour inciter les agriculteurs à s'engager plus fortement dans cette spéculation, un prix de vente proche de 100 euros par tonne (contre environ 60 euros par tonne aujourd'hui, aides POSEI comprises) (Rapport final, Blazy et al., 2012).

Néanmoins, le niveau d'acceptabilité relatif au prix de la canne fibre sera à priori variable selon les agriculteurs en fonction de la supériorité de la marge nette à l'hectare de la canne fibre par rapport à la culture produite actuellement (Blazy et al., 2012).

L'adoption de la filière dépendra aussi de la charge de travail nécessaire et du type de contrat proposé.

D'autre part il semble important de signaler que l'implantation de cette filière ne doit pas se faire au détriment des productions alimentaires saines destinées au marché local.

L'adoption d'une nouvelle filière par l'ensemble des acteurs agricoles n'est pas simple et les avis sont mitigés, surtout lorsqu'il s'agit de la reconversion d'une culture qui a toujours eu pour vocation de produire du sucre et du rhum en une culture énergétique. En effet, l'adoption d'une filière innovante, qui n'a pas encore véritablement fait ses preuves en dehors des parcelles expérimentales, peut très bien constituer ou du moins être perçue comme une source d'incertitude pour les agriculteurs. La mise en place d'une unité pilote permettrait, dans un premier temps, de rassurer les acteurs du secteur agricole en limitant la prise de risque.

Dans la suite du programme, il s'agira donc de travailler en étroite collaboration avec les acteurs du secteur agricole car l'adoption de cette filière est une des conditions indispensables à son développement. La disponibilité des parcelles, liée à l'acceptation de la filière par les agriculteurs, est aussi un des facteurs qui va conditionner la mise en place de la filière. Les paramètres d'éligibilité des parcelles sont liés aux caractéristiques des parcelles, à la rentabilité des spéculations actuelles, au prix d'achat de la canne fibres ainsi, aux rendements agronomiques (t/ha/an) ainsi qu'aux différentes politiques de soutiens des filières.

#### IV. Durabilité des systèmes et développement de l'île

Le programme REBECCA est décomposé en plusieurs volets (Agro-variétale, environnemental, économique et social, industriel) dont les résultats permettent d'apporter des éléments de réponse à la faisabilité du projet et aux risques associés à sa mise en place. Il paraît maintenant indispensable de coupler les données et résultats issus de chaque volet afin d'éclairer les choix futures de la filière canne-énergie (dimensionnement de la centrale électrique principalement) et d'évaluer sa durabilité agro-environnemental et socio-économique sachant que chacune de ces « échelles » sont « interdépendantes ». Par exemple la durabilité économique est étroitement dépendante du niveau de production et de la fixation des prix.

A l'échelle agro-environnementale, des premiers résultats scientifiques ont permis d'apporter des premiers éléments de réponse sur la faible quantité de CLD présente dans la biomasse combustible et sur la dégradation de cette molécule lors de la combustion. Les impacts environnementaux liés à la filière ont aussi été évalué comme étant moins important que ceux de la filière électrique conventionnelle. Néanmoins, des études complémentaires sont nécessaire, principalement sur la gestion de la matière organique et l'évolution de la fertilité des sols en vue d'éviter la diffusion de la CLD dans l'environnement mais aussi d'assurer la durabilité et la stabilité des rendements (quelles méthodes pour suivre l'évolution de la fertilité des sols : mise en place d'indicateur, ou de modèles).

Du point de vue socio-économique, certains points relatifs à la création d'emploi restent encore à éclaircir puisqu'elle dépend d'autres paramètres tels que la puissance de la centrale électrique qui sera mise en place et la surface de terre disponible pour la mise en culture des cannes-fibres. D'autre part, des études complémentaires sur les attentes des différents acteurs, et principalement les acteurs agricoles devraient être réalisées

Au terme de la première phase du programme et après seulement deux ans de recherche, il n'est donc pas possible de conclure définitivement sur la durabilité de la filière canne-énergie.

Afin d'évaluer la durabilité de cette filière, un outil d'évaluation pourrait être élaboré ultérieurement à partir d'indicateurs soigneusement sélectionnés à chaque échelle (sociale, économique, environnementale et agronomique) et représentatifs du contexte Guadeloupéen. Sur la base des méthodes d'évaluation de la durabilité des systèmes (IDEA, ARBRE), il faudrait prioriser les indicateurs en fonctions des acteurs concernés et des niveaux d'étude. Cet outil permettrait alors de voir si la filière répond bien aux enjeux actuels de la Guadeloupe et aux attentes des différents acteurs et de l'améliorer/adapter si besoin est.

## Conclusion générale

---

La Guadeloupe est confrontée à de nombreux enjeux d'ordre énergétiques, environnementaux et économiques qui ont favorisé et justifié l'émergence du programme REBECCA en 2009. Ainsi, la mise en place d'une filière de production de canne fibres dédiée à la création d'électricité permettrait de répondre aux enjeux auxquels se retrouve confrontée la Guadeloupe. Dans ce cadre, le travail s'est focalisé sur la répartition de la chlordécone (CLD) dans la plante et sur son devenir lors de la combustion.

Les plus fortes concentrations de chlordécone dans la canne à sucre à vocation de combustible sont restées localisées dans les racines et les premiers centimètres des tiges aériennes restant sur la parcelle. Il s'avère finalement que seule une très faible quantité de CLD est exportée des parcelles.

D'autre part, aucune trace de CLD n'a été retrouvée dans les cendres issues de la combustion de bagasse contaminée. L'impact de la combustion de canne chlordéconée paraît donc être équivalente à celui de cannes non contaminées.

La contamination des sols à la CLD ne serait donc pas, d'après les premiers résultats, un frein à la mise en place d'une filière de canne à usage de combustible.

Une étude plus bibliographique, à partir des travaux faits dans le programme REBECCA a permis de mettre en évidence que cette filière permettrait aussi une limitation des émissions de GES via une diminution de l'utilisation des énergies fossiles. D'un point de vue énergétique, ce programme permettrait de contribuer à faire face à l'augmentation des consommations en électricité prévue d'ici 2020 et de réduire la dépendance énergétique de la région. Sur un plan économique ce programme représente une opportunité pour les planteurs de canne de la Basse-Terre actuellement trop éloignée de la sucrerie de Gardel. Cependant, l'émergence de cette filière dépend de l'intégration de l'ensemble des acteurs de la zone, notamment les agriculteurs ainsi qu'une disponibilité suffisante en surface agricole. Certaines conditions doivent donc être prises en compte comme, entre autre, un rendement au moins équivalent à la filière canne-sucre pour l'agriculteur.

Le programme REBECCA est spécifique du contexte guadeloupéen, notamment avec la problématique environnementale liée à la présence de la Chlordécone. Toutefois, un tel projet doit pouvoir être transposable dans d'autres zones géographiques en particulier les autres îles de l'arc antillais dont beaucoup ont des problématiques comparables de culture de canne à sucre possible, mais sur de petites surfaces, et de coût de l'énergie. Il répond donc à un enjeu global.

Sur un plan encore plus général le travail s'inscrit dans la problématique du développement des pays du Sud. Les besoins énergétiques mondiaux devraient doubler d'ici à 2020. Le développement de la biomasse-énergie représente donc une perspective intéressante, parmi d'autres dans les régions au climat tropical en permettant de répondre à cette hausse sans épuiser les énergies fossiles et en limitant les impacts sur l'environnement. Les pays en voie

de développement possèdent bien sûr d'autres alternatives que la biomasse mais celle-ci paraît plus adaptée en termes de coût, de diversité, de rendements élevés et d'acceptation socio-culturelle. Il convient toutefois d'être prudent, l'exploitation de la biomasse doit être réalisée avec rationalité en adéquation avec l'allocation des terres et de la ressource en eau. Le développement et la production de culture énergétique ne doit pas entraver la production alimentaire ni dégrader les ressources naturelles comme le patrimoine forestier par exemple.



## Bibliographie

---

### Articles et rapports scientifiques :

Alexander A.G. 1985. The energy cane alternative. Sugar series, 6. Elsevier Science Publisher, B.V. 510 p.

Alexander A.G., Samuels G., RIOS C., Garcia M. 1984. The Production of Energy Cane in Puerto Rico: The Hatillo Project, American society of sugar cane technologists. 4 pages.

Angeon. V. 2011. De la nécessité d'une agriculture innovante dans les départements français d'Amérique. Innovations Agronomiques 16 (2011), 217-238.

Bertrand.D. 2002. La spectroscopie proche infrarouge et ses applications dans les industries de l'alimentation animale. INRA production animale. Pages 209-219.

Bilba K, Arsene M-A et Ouensanga A Sugar cane bagasse fibre reinforced cement composites. Part I. Influence of the botanical components of bagasse on the setting of bagasse/cement composite [Revue] // Cement and Concrete Composites. - 2003. - 1 : Vol. 25. P 91 - 96.

Bilionière M., Vers une production de biomasse dédiée à l'énergie dans le sud de la Basse-Terre. Mémoire de master de l'Université des Antilles Guyane, 2011, 81p.

Briggs, G. G.; Bromilow, R. H.; Evans, A. A.; Williams, M. 1982. Relationship between lipophilicity and root uptake and translocation of non-ionised chemicals by barley. Pestic. Sci., 13, 495-504.

Brunet Didier [et al.] Determination of soil content in chlordecone (organochlorine pesticide) using near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) [Revue] // Environmental Pollution. - 2009. - 11 : Vol. 157. - pp. 3120 - 3125. - 0269-7491.

Bonan H., Prime, J.L., 2001. Rapport sur la présence de pesticides dans les eaux de consommation humaine en Guadeloupe. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement.

Bonvallot N, Dor F. (2004). Insecticides organochlorés aux Antilles : identification des dangers et valeurs toxicologiques de référence (VTR). 52 p.

Cabidoche.Y-M, Jannoyer.M, Vannière.H. 2006. Pollution par les organochlorés aux Antilles. Conclusion du Groupe d'Etude et de Prospective. Aspects agronomiques. CIRAD/INRA. 66 pages.

Cabidoche Y.-M., Achard R., Cattan P., Clermont-Dauphin C., Massat F., Sansoulet J.. 2009. Long-term pollution by chlordecone of tropical volcanic soils in the French West Indies: a simple leaching model accounts for current residues. Environ. Poll., 157, p 1697-1705.

Cabidoche. Y-M, Lesueur-Jannoyer. M. 2011. Diagnostic et perspectives de remédiations de la pollution à la chlordécone aux Antilles. 1 page.

Cabidoche Y.M, Lesueur Jannoyer M. 2011. Pollution durable des sols par la chlordécone aux Antilles : comment la gérer ? Innovations Agronomiques 16 (2011), pages 117-133.

Cannon, SB; Veazey, JM; Jackson, RS; et al. (1978) Epidemic Kepone poisoning in chemical workers. Am J Epidemiol 107: p 529–537.

Chabalier.P, Babamoussa.I.1999. Etude de la valeur agronomique des cendres de bagasses de la centrale thermique du Gol. Note CIRAD CA GEC Réunion.16p.

Chopart J.L. 1999. Relations entre état physique du sol, systèmes racinaires et fonctionnement hydrique du peuplement végétal : outils d'analyse *in situ* et exemples d'études en milieu tropical à risque climatique élevé. France. Thèse Univ. J. Fourier Grenoble, 350 p.

Chopart JL 2004. Les systèmes racinaires des cultures tropicales : rôle, méthodes d'étude *in situ*, développement, fonctionnement. Document de synthèse note cirad 43p.

Chopart JL, Le Mézo. L, Mezino.M. 2009. PROBE-w (PROgramme de Bilan de l'Eau): logiciel de modélisation du bilan hydrique dans un sol cultivé. Présentation et guide d'utilisation. 18 p.

Chopart JL,. Azevedo M.C.B, Le Mézo L., Marion D., 2010. Functional Relationship Between Sugarcane Root Biomass and Length for Cropping System Applications. 5 p.

Chopart JL 2012a. Résultats du programme REBECCA phase 1 de septembre 2011 à mars 2012.Volet agro-variétal. Note scientifique CIRAD REBECCA N°6, avril 2012

Chopart JL. 2012b. Rapport final phase 1, 126 pages.

- Volet agro-variétal : Chopart JL, Auzoux S, Bachelier B, Bastianelli D, Bonnal L
- Volet Chlordécone : Chopart JL, Lebert B, Marie P, Mouras S
- Volet Economie environnement : Blazy JM, Bilonière M, Causeret F, Chopart JL, Chopin P, Diman JL, Fusillier JL Guindé L, Lejars C, Merle T

Chopart JL, Marie P, 2012. Estimation de la biomasse résiduelle potentiellement disponible après une culture de canne à usage de combustible dans le Sud de la Guadeloupe. Note scient. REBECCA n° 9, juin, 17p.

CIRAD-INRA.2010. Conclusions de l'Atelier « Remédiation à la pollution par la chlordécone aux Antilles ». 32 pages.

Clostre F., Lesueur-Jannoyer M. 2012. Transfert de la chlordécone du sol vers les produits cultivés. Document de synthèse Cirad : 19 p.

Cohn, WJ; Boylan, JJ; Blanke, RV; et al. (1978) Treatment of chlordecone (Kepone) toxicity with cholestyramine: results of a controlled trial. p 243–248.

Courteau.A. 2005. La canne à sucre et l'environnement à la Réunion : revue bibliographique. Rapport de stage de maîtrise. 53 p.

Dawson, G. W., W. C. Weimer et S. J. Shupe (1979). "Kepone-A case study of a persistent material." The American Institute of Chemical Engineers (AIChE) Symposium Series 75. p 366-374.

Demirbas A., 2001. Bioman resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management*. 42: 1357-1378.

Denys.S. 2002. Modèles de transfert sol-plante des polluants organiques. Tome 1 : revue bibliographie. INERIS. Unité Déchets et Sites pollués. Direction des Risques Chroniques. (6-8). 59 p.

Don C.E., Mellet P., Ravno B.D., Bodger R., 1977. Calorific values of South African Bagasse. *Proceeding of the South African Sugar Technologists Associations*.

Dubuisson, C., Heraud, F., Leblanc, J.C., Gallotti, S., Flamand, C., Bateau, A., Quenel, P. and Volatier, J.L., 2007. Impact of subsistence production on the management options to reduce the food exposure of the Martinican population to Chlordecone. *Regul Toxicol Pharmacol* 43/1. p 5-16.

George S.E and Claxton L.D. (1988). Biotransformation of chlordecone by *Pseudomonas* species. *Xenobiotica*, 18. p 407- 416.

Hunsigi Gururaj, 1995. Sugarcane in agriculture and industry. Prism books. 472 pages.

Kermarrec A. et al., Niveau actuel de la contamination des chaînes biologiques en Guadeloupe : pesticides et métaux lourds, 1980, Rapport collectif coordonné par INRA – Centre Antilles-Guyane auprès du Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie, 155 p.

Klass Donald. L, 1998. Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals. Academic press. 651 p.

Laclau J.P., Ranger J., De Moraes Gonçalves J.L., Maquère V., Krusche A.V., Thongo M'Bou A., Nouvellon Y., Saint-André L., Bouillet J.P., De Cassia Piccolo M., Deleporte P. 2009. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical *Eucalyptus* plantations Main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. *Forest Ecology and Management* 259, p 1771-1785.

Lejars C., Pouzet D., Etude de faisabilité d'une unité pilote de valorisation énergétique de la biomasse cannière en Guadeloupe, 2008 : Partie I : Situation initiale, 64 p.

Macarie H. et Dolfing J., 2011. La chlordécone (CLD) est-elle véritablement réfractaire à une dégradation microbienne ? Remédiation à la pollution par la chlordécone dans les Antilles. *Cahiers du PRAM* n° 9-10. p 25-30.

Marie P, Chopart JL, 2012a. Répartition de la chlordécone dans les composantes des biomasses aériennes et souterraines de cinq variétés de canne à sucre dans un sol volcanique pollué de Guadeloupe. *Note scient. REBECCA* n° 10, juillet 2012, 17p.

Marie P, Chopart JL, 2012b. Il n'y a pas de chlordécone dans des cendres issues de la combustion en chaudière industrielle de la bagasse de canne à sucre cultivée sur un sol contaminé. Note scient. REBECCA n° 11, juillet 2012, 4p.

Merle.T, 2012. Guide de l'outil REBECCA-ACV v1.0 : Application de la méthodologie ACV au projet REBECCA.

Multigner.L, Ndong JR, Giusti An Romana M, Delacroix-Maillard H, Cordier S, Jégou B, Thome JP, Blanchet P. 2010. Chlordecone Exposure and Risk of Prostate Cancer. American Society of Clinical Oncology. p 3457-3462.

Nativel. C. 2009. Quel développement durable pour le petit espace insulaire ? Le cas de l'île de la Réunion. Cahier de recherche. HEC Paris. 86 p.

Poggi-Varaldo H.M., Rinderknecht-Seijas N., Caffarel-Méndez S. (2002). Irreversibility of the adsorptive-desorptive behavior of pollutants in soils and sediments : quantitative evaluation by using a differential hysteresis coefficient. *Interciencia*, 27. p 180-185.

Pouzet D., 2011. Production durable de biomasse. La lignocellulose des poacées (Coll. synthèses). Parution 06-2011. 187 p.

PATERSON S., MACKAY D., TAM D., SHIU W.Y., 1990. Uptake of organic chemicals by plants : a review of processes, correlations and model. *Chemosphere*, 21. p 297-331.

ROSSI, Georges. L'ingérence écologique. CNRS EDITIONS. Paris, 2000. 248p.

Taylor, JR. (1982) Neurological manifestations in humans exposed to chlordecone and follow-up results. *Neurotoxicology* 3(2). p 9–16.

Topp.E., I.Scheunert, A. Attar et F. Korte, 1986. Factors affecting the uptake of <sup>14</sup>C labeled organic chemicals by plants from soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 11(2): p 219-228.

Sharma, G and Campbell, A., 2003, Life Cycle Inventory and Life Cycle Assessment for Windrow Composting Systems, Recycled Organics Unit, University of New South Wales, Sydney, Australia. 171 p.

Shone, M. G. T.; Wood, A. V. 1974. A comparison of the uptake and translocation of some organic herbicides and a systemic fungicide by barley. I. Absorption in relation to physiochemical properties. *J. Exp. Bot.*, 25, 390-400.

Simonich SL, Hites RA. 1995. "Global distribution of persistent organochlorine compounds". *Science* 269 (5232). p 1851- 1854.

Trapp, S., McFarlane, C. 1995. Plant contamination. Boca Raton: Lewis Publisher.

Waclawovsky A. J., Sato P. M., Lembke C.G., Moore P.H. and Glaucia M. Souza G. M., 2010. Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content. *Plant Biotechnology Journal*. 8. p 263–276

**Autres documents :**

AFSSA.2007. Avis de l'AFSSA relatif à l'actualisation des données scientifiques sur la toxicité du chlordécone en vue d'une éventuelle révision des limites tolérables d'exposition proposées par l'AFSSA en 2003. Afssa-Saisine n°2007-SA-0305. 6 p.

Agreste Primeur. 2011. La canne à sucre en Guadeloupe, en Martinique et à la Réunion. Numéro 256. 4 p.

Cann'elec Développement, société, Saint Nazaire.

Centre Technique de la Canne à sucre de Guadeloupe. 2007. Rapport de campagne. 44 pages.

CTICS Guadeloupe. 2010. Evolution production « canne et sucre 1960/2007, Rapport de campagne 2007 ». 31 p.

DAAF, AGRESTE, Memento agricole Guadeloupe, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009

Insee. 2010. L'industrie en Guadeloupe, un secteur face à ses défis. 84 pages.

Mardivirin M. 2000. Les évolutions de l'agriculture en Guadeloupe : caractéristiques et enjeux. 4 p.

Organisation météorologique mondiale. 2006. Climat et petits états insulaires en développement. 12 p.

Pouzet D, Lejars C, Guichar R, 2009.Cann'elec ou l'électricité verte. 7 pages.

PRERURE. 2008. Plan énergétique régional pluriannuel de prospection et d'exploitation des énergies renouvelables et d'utilisation rationnelle de l'énergie de la Guadeloupe à l'horizon 2020. Rapport final. 190 p.

US EPA. 2009. Toxicological review of Chlordécone (Kepone). CAS n° 143-50-0. 119 p.

## Tables des annexes

---

Annexe 1 : Résultats des analyses chlordécone sur les parcelles du Fromager (Capesterre Belle eau) et cartographie des parcelles prélevées.....	76
Annexe 2 : Estimation des biomasses racinaires en t/ha entre 0 et 30 cm de profondeur.....	78
Annexe 3 : Rendement de biomasse de canne à sucre à 8 et à 12 mois.....	79.
Annexe 4 : Teneurs en fibres des différentes composantes des cannes à sucres obtenues par mesures SPIR.....	83
Annexe 5 : Apport de biomasse dans les différents compartiments du sol.....	84
Annexe 6 : Analyse du cycle de vie de la filière canne-énergie.....	85

## Annexe n° 1 : Résultats des analyses chlordécone sur les parcelles du Fromager (Capesterre Belle eau) et cartographie des parcelles prélevées. Carib agro, 2010.

### Mesures et analyses effectuées :

- ✓ **Analyses pesticides** : Chlordécone (CLD) et la Chlordécone Hydro (dérivé de la CLD)
- ✓ **Analyses chimiques** : Carbone et Azote total, du pH eau et pH KCl
- ✓ **Mesures physiques du sol** : Densité apparente, Porosité, Teneur en eau des sols
- ✓ **Estimations** :
  - Chlordécone (CLD) Disponible : pouvoir contaminant d'un sol : capacité à relarguer la CLD dans l'environnement, dépend de la teneur en CLD du sol, de la densité apparente, de la teneur en eau des sols.
  - Stock de Chlordécone (CLD): quantité de CLD restante dans les sols, dépend des teneurs en CLD et de la densité apparente des sols.

### Tableau de résultats

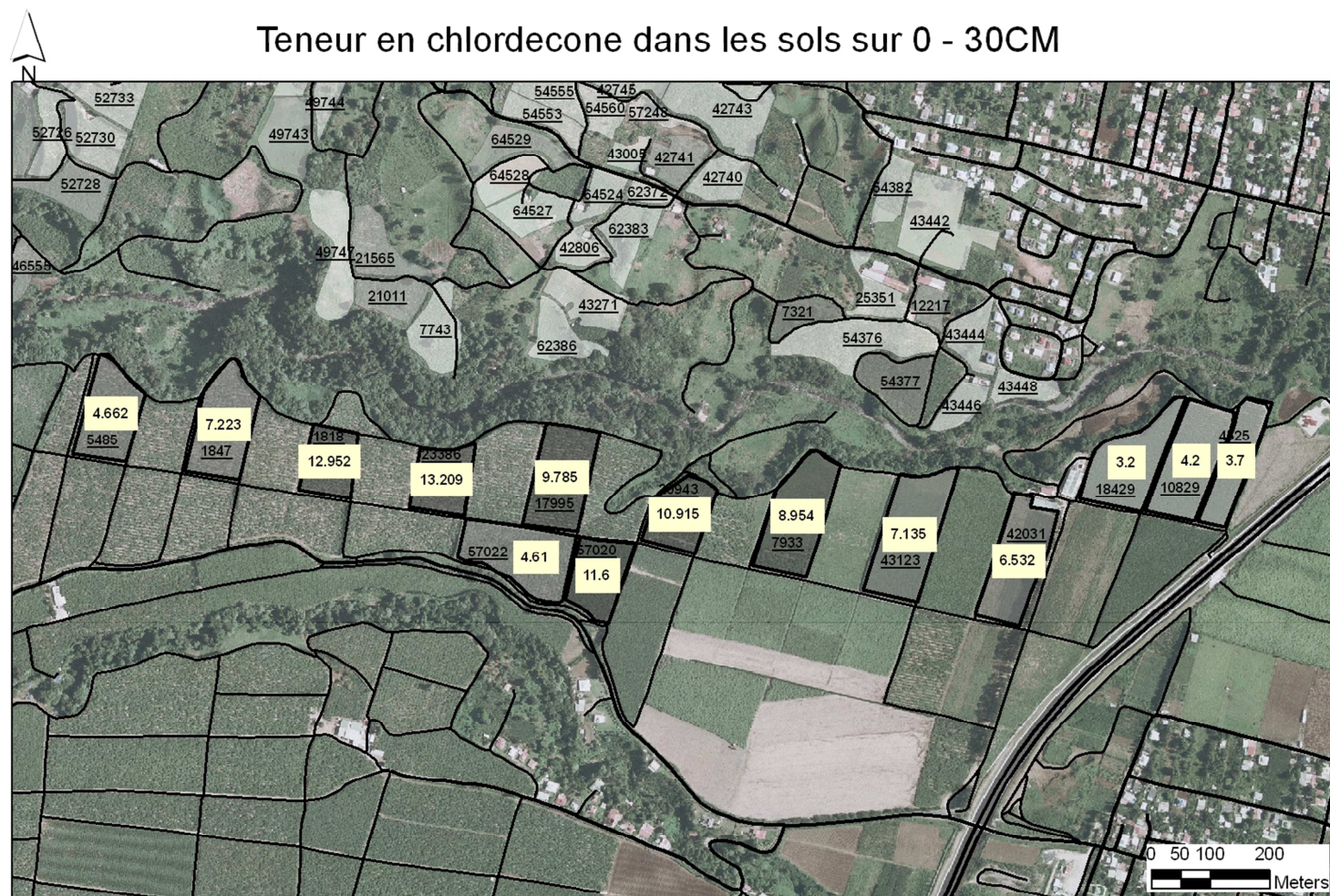
ECHANTILLONAGE			CARACTERISTIQUES DE SITE					MESURES PHYSIQUES			ANALYSES CHIMIQUES				ANALYSES CLD			
Planteurs	Date	Prof (cm)	I_parcelle	Xpr	Ypr	Altitude (m)	Type Sol	Porosité	Teneur en eau	Densité apparente (t/m3)	Azote tot (%MS)	Carbone tot (%MS)	pHEau	pHkcl	CLD (mg/kg)	CLDhydro (mg/kg)	Stock_CLD (Kg/ha)	CLD Disponible (µg/m3)
Bologne	3/17/2010	0-30	42031	652490.00	1775104.40	60	Andosol	0.66	0.47	0.90	0.32	3.56	5.9	5.0	6.53**	0.09	17.6	48.8
Bologne	3/17/2010	0-30	43123	652308.73	1775149.58	68	Andosol	0.69	0.45	0.80	0.35	3.92	5.9	5.0	7.14**	0.15	17.2	47.2
Bologne	3/18/2010	0-30	7933	652118.69	1775180.50	79	Andosol	0.65	0.52	0.92	0.35	3.94	6.0	5.1	8.95**	0.221	24.7	68.1
Bologne	3/18/2010	0-30	20943	651919.29	1775183.28	88	Andosol	0.65	0.54	0.91	0.41	4.41	5.8	5.0	10.92**	0.15	29.8	76.3
Bologne	3/19/2010	0-30	17995	651716.67	1775246.72	101	Andosol	0.67	0.54	0.85	0.46	4.92	5.3	4.5	9.79**	0.198	25.0	61.2
Bologne	3/19/2010	0-30	23386	651516.25	1775242.46	112	Andosol	0.67	0.56	0.85	0.50	5.37	5.6	5.0	13.21**	0.32	33.8	78.7
Bologne	3/22/2010	0-30	1818	651324.36	1775273.37	121	Andosol	0.68	0.56	0.82	0.53	5.66	5.7	4.8	12.95**	0.24	32.0	73.3
Bologne	3/22/2010	0-30	1847	651144.54	1775336.50	133	Andosol	0.69	0.57	0.81	0.52	5.43	5.2	4.6	7.22**	0.062	17.5	43.4
Bologne	3/23/2010	0-30	5485	650950.12	1775355.49	138	Andosol	0.71	0.50	0.76	0.40	4.32	5.2	4.6	4.66**	0.055	10.6	30.6
Bologne	7/1/2010	0-30	57020	651779.75	1775079.13	98	Andosol	0.65	0.59	0.92	0.45	4.79	5.5	4.8	11.6**	0.21	32.0	82.2
Bologne	8/25/2010	0-30	57022	651649.67	1775113.61	103	Andosol	0.69	0.48	0.80	0.41	4.38	5.6	4.9	4.61**	0.03	11.1	29.1

### Recommandations de culture sur les sols

\*Sol contaminé inférieur à 0.01mg/kg : « vous pouvez planter sans restriction »

\*\*sol contaminé supérieure à 0.01 : « il est déconseillé de planter les cultures à risques » (si vous plantez, l'analyse sur végétaux avant commercialisation est obligatoire et à vos frais).





### Legende

En souligné : 1 parcelle

En encadré : Teneur en CLD en mg/Kg

Cirad Guadeloupe 2011, analyses chlordecone (LDA 26).



**Annexe n° 2 : Estimation des biomasses racinaires en t/ha entre 0 et 30 cm de profondeur. Mesures effectuées sur 3 variétés de cannes à sucre, essai V4 à 10 mois. (Marie, 2012).**

		Biomasses sèche en t/ha		
profondeur		R579	WI86015	WI81456
0-15	Racines fines	0,33	0,28	0,36
	racines grosses	0,73	1,02	0,95
	total 0-15	1,07	1,30	1,31
15-30	Racines fines	0,34	0,24	0,17
	Racines grosses	0,51	0,87	0,40
	total	0,85	1,12	0,57
total 0-30	Racines fines	0,67	0,53	0,53
	racines grosses	1,25	1,90	1,35
	total	1,92	2,42	1,88

### Annexe n° 3 : Rendement de biomasse de canne à sucre à 8 et à 12 mois. Essais V3 et V4.

Essai V3 à 8 mois, moyenne de 3 répétitions

Les rendements de biomasses racinaires ont été obtenus à partir des mesures réalisées à l'âge de 10 mois.

Essai V3 8 mois		Pds composantes g de MS /partie d'1tige	nombre Tiges/m <sup>2</sup>	Rdt /composantes g MS / m <sup>2</sup>	CLD µg/kg MS	CLD/surface cultivée g/ha
R579	Sol				7086,667	
	Racines			299	10565	32
	Tiges souterraines	43	6,7	296	814	2,51
	Entrenoeuds 1-5	150	6,7	1038	10,3	0,120
	Entrenoeuds 6-10	118	6,7	803	1,0	0,008
	Entrenoeuds 11-20	70	6,7	490	1,3	0,006
TC8	Sol				5963	
	Racines			298,97	8951	27
	Tiges souterraines	21	10,7	227	955	2,24
	Entrenoeuds 1-5	105	10,7	1096	23,3	0,252
	Entrenoeuds 6-10	84	10,7	860	2,0	0,019
	Entrenoeuds 11-20	70	10,7	729	2,3	0,019
F176	Sol				6233,333	
	Racines			299	6136	18
	Tiges souterraines	26	6,0	157	875	1,4
	Entrenoeuds 1-5	138	6,0	834	14	0,118
	Entrenoeuds 6-10	102	6,0	607	2,7	0,014
	Entrenoeuds 11-20	67	6,0	392	4,0	0,013

Essai V3 à 12 mois, moyenne de 3 répétitions

Les rendements de biomasses racinaires ont été obtenus à partir des mesures réalisées à l'âge de 10 mois.

Essai V3 12 mois		Pds composantes g de MS /partie d'1tige	nombre Tiges/m <sup>2</sup>	Rdt /composantes g MS / m <sup>2</sup>	CLD µg/kg MS	CLD/surface cultivée g/ha
R579	Sol				ND	
	Racines			299	12574	38
	Tiges souterraines	63	9	522	797	4
	Entrenoeuds 1-5	238	9	1949	57	1,16
	Entrenoeuds 6-10	205	9	1694	5	0,10
	Entrenoeuds 11-20	266	9	2196	2	0,04
TC8	Sol				ND	
	Racines			299	10089	30
	Tiges souterraines	41	12	475	450	2
	Entrenoeuds 1-5	148	12	1728	44	0,73
	Entrenoeuds 6-10	117	12	1345	5	0,07
	Entrenoeuds 11-20	168	12	1973	7	0,13
F176	Sol				ND	
	Racines			299	6136	18
	Tiges souterraines	209	8	1674	2	0,03
	Entrenoeuds 1-5	238	8	1920	2	0,03
	Entrenoeuds 6-10	102	8	607	2,7	0,01
	Entrenoeuds 11-20	67	8	392	4,0	0,01

Essai V4 à 8 mois, moyenne de 3 répétitions

Les rendements de biomasses racinaires ont été obtenus à partir des mesures réalisées à l'âge de 10 mois.

Essai V4 8 mois		Pds composantes g de MS /partie d'1tige	nombre Tiges/m <sup>2</sup>	Rdt /composantes g MS / m <sup>2</sup>	CLD µg/kg MS	CLD/surface cultivée g/ha
R579	Sol				9817	
	Racines			299	9092	27
	Tiges souterraines	38	9	328	599	2
	Entrenoeuds 1-5	146	9	1259	28	0,335
	Entrenoeuds 6-10	114	9	978	2	0,022
	Entrenoeuds 11-20	121	9	1045	6	0,066
WI86015	Sol				12140	
	Racines			299	7389	22
	Tiges souterraines	23	8	193	441	1
	Entrenoeuds 1-5	24	8	789	2732	7,96
	Entrenoeuds 6-10	77	8	663	190	0,39
	Entrenoeuds 11-20	81	8	633	21	0,11
WI81456	Sol				11420	
	Racines			299	6136	18
	Tiges souterraines	27	15	388	541	2,05
	Entrenoeuds 1-5	125	15	1783	45	0,705
	Entrenoeuds 6-10	104	15	1490	6,3	0,101
	Entrenoeuds 11-20	49	15	723	8,3	0,046

Essai V4 à 12 mois, moyenne de 3 répétitions

Les rendements de biomasses racinaires ont été obtenus à partir des mesures réalisées à l'âge de 10 mois.

Essai V4 12 mois		Pds composantes g de MS /partie d'1tige	nombre Tiges/m <sup>2</sup>	Rdt /composantes g MS / m <sup>2</sup>	CLD µg/kg MS	CLD/surface cultivée g/ha
R579	Sol				ND	
	Racines			299	7719	23
	Tiges souterraines	47	9	399	754	3,034
	Entrenoeuds 1-5	157	9	1332	117	1,606
	Entrenoeuds 6-10	172	9	1474	13	0,197
	Entrenoeuds 11-20	251	9	2145	1,0	0,021
WI86015	Sol				ND	
	Racines			299	4595	13,74
	Tiges souterraines	33	12	387	675	3
	Entrenoeuds 1-5	104	12	1204	44	1
	Entrenoeuds 6-10	118	12	1377	3,333	0
	Entrenoeuds 11-20	135	12	1580	1,500	0
WI81456	Sol				ND	
	Racines			299	6736	20
	Tiges souterraines	32	17	537	658	3,530
	Entrenoeuds 1-5	164	17	2667	38	0,946
	Entrenoeuds 6-10	159	17	2589	3,333	0,090
	Entrenoeuds 11-20	162	17	2730	1,500	0,037

**Annexe n° 4 : Teneurs en fibres des différentes composantes des cannes à sucres obtenues par SPIR.**

Teneur en fibre (cellulose, hémicellulose, lignine) en % de matière sèche sur des cannes âgées de 8 et 12 mois sur les essais V3 et V4. La variété R579 est un témoin local. Les chiffres d'un même essai suivis d'une même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différents suivant le test de Newman-Keuls au seuil de 0.05

Essai	Variété	Tiges souterraines		Entre-nœuds 1-5		Entre-nœuds 6-10		Entre-nœuds 11-20	
		8 mois	12 mois	8 mois	12 mois	8 mois	12 mois	8 mois	12 mois
V3	R579	49a	55a	44b	50b	44b	44b	54a	43a
	TC8	59a	59a	54a	57a	50a	53a	56a	45a
	F176	53a	60a	47b	55a	48a	51a	58a	45a
V4	R579	52c	51a	46c	45b	43c	46c	46a	40b
	WI86015	56b	52b	54b	49b	56b	51b	63b	56a
	WI81456	68a	59b	71a	59a	72a	61a	70c	58a

**Annexe n° 5 : Apport de biomasse dans les différents compartiments du sol (Chopart et Marie, 2012)**

Les quantités de biomasse sont exprimées en g/dm<sup>3</sup> chez 3 variétés de l'essai V4 à 12 mois (a) : R579, (b) : WI86015, (c) : WI 81456). Les compartiments sont définis comme : TA : 10 premiers cm des tiges aériennes ; TS : tiges souterraines ; RA: racines ; FT : feuilles tombées naturellement.

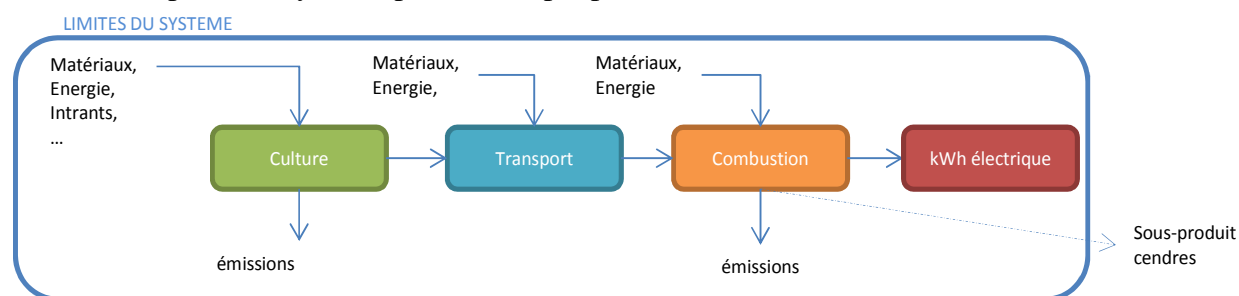
a) R579		0-10 cm	10-40cm	40-80cm
0-15 cm	Tiges aériennes (0-10 cm)	2,4	0	0
	Tiges souterraines	0,53	0	0
	Racines	1,26	0,92	0,42
	Feuilles tombées (FT)	0	1,44	1,44
	Total	4,19	2,36	1,86
15-30 cm	Racines	0,43	0,71	0,49

b) WI86015		0-10 cm	10-40cm	40-80cm
0-15 cm	Tiges aériennes (0-10 cm)	2,53	0	0
	Tiges souterraines	0,52	0	0
	Racines	2,15	1,11	0,37
	Feuilles tombées (FT)	0	0,76	0,76
	Total	5,2	1,87	1,13
15-30 cm	Racines	0,80	1,02	0,53

c) WI81456		0-10 cm	10-40cm	40-80cm
0-15 cm	Tiges aériennes (0-10 cm)	3,31	0	0
	Tiges souterraines	0,72	0	0
	Racines	1,52	0,44	0,44
	Feuilles tombées (FT)	0	1	0,61
	Total	5,55	1,44	1,05
15-30 cm	Racines	0,32	0,48	0,32

## Annexe n° 6 : Analyse du cycle de vie de la filière canne-énergie. (Merle.T, 2012)

Schéma simplifié du système pris en compte pour l'étude ACV de la filière (Merle.T, 2012).



Détail des paramètres utilisés dans la construction des 2 scénarios de référence (Merle.T, 2012).

Définition des paramètres	Scénario de référence 5 MW	Scénario de référence 10 MW
Gisement (ha)	506,000	1 012,000
rendement (t MF plante entière /ha)	150,000	150,000
Variété	TC8	TC8
Part de fuel	15%	15%
Facteur Emission directe N2O	1%	1%

Profil environnemental simplifié (7 indicateurs) des 2 scénarios de référence et du mix électrique Guadeloupe. (Merle.T, 2012).

	Scénario de référence 5 MW	Scénario de référence 10 MW	Mix électrique Guadeloupe
	1 kWh électrique	1 kWh électrique	1 kWh électrique
Changement climatique (g CO2 eq)	289,484	291,785	710,106
Consommation d'énergie primaire (kWh)	0,988	0,998	2,659
oxydation photochimique(kg NMVOC)	3,056E-03	3,085E-03	3,581E-03
Acidification terrestre(kg SO2 eq)	5,320E-03	5,339E-03	6,049E-03
Eutrophisation eau douce (kg P eq)	1,293E-04	1,287E-04	1,592E-04
Eutrophication eau de mer(kg N eq)	1,746E-04	1,755E-04	1,998E-04
Compétition territoriale (m²a)	1,382E-01	1,381E-01	9,191E-03



